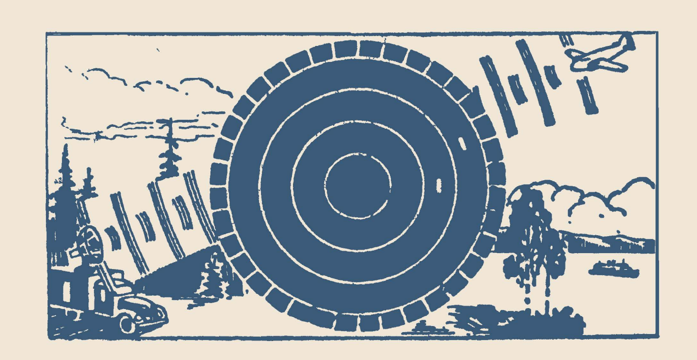


К. А. ТРАСКИН

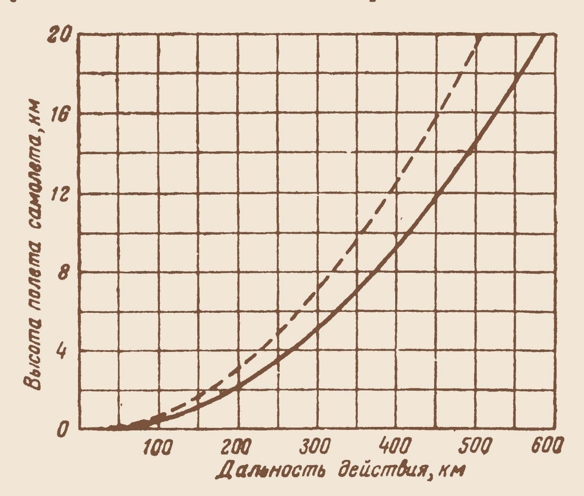
РАДИОЛОКАЦИОННАЯ ТЕХНИКА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ





ДАЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ

Максимальная возможная дальность обнаружения целей радиолокационными станциями при прочих равных условиях (мощности в импульсе, чувствительности приемника, высоте расположения антенны и др.) ограничена кривизной земной поверхности и без учета рефракции и дифракции радиоволн равна прямой оптической видимости. Для наземных радиолокационных станций обнаружения воздушных целей она зависит от высоты расположения антенны станции над землей H_1 и высоты полета самолетов H_2.



Эта максимальная дальность обнаружения может быть рассчитана по формуле:

$$Д = K(\sqrt{H_1} + \sqrt{H_2}),$$

где $Д$ — максимальная возможная дальность обнаружения самолетов в *км*;

H_1 и H_2 — высота расположения антенны над землей и высота полета самолета в метрах;

K — коэффициент, равный для оптической видимости 3,57 и для радиолокационных станций с учетом рефракции и дифракции радиоволн — 4,15.

Так как высота расположения антенн мала по сравнению с высотой полета самолетов, то первым слагаемым, стоящим в скобках, можно пренебречь; тогда максимальную дальность обнаружения самолетов в зависимости от высоты их полета можно определить по формуле:

$$Д = 4{,}15\sqrt{H_2}.$$

На приведенном графике дана кривая максимальной возможной дальности обнаружения самолетов рассчитанная по последней формуле. Для сравнения на графике пунктиром дана кривая максимальной оптической видимости.

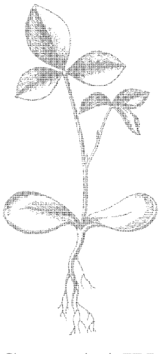
МАССОВАЯ РАДИО БИБЛИОТЕКА

ПОД ОБЩЕЙ РЕДАКЦИЕЙ АКАДЕМИКА А. И. БЕРГА

Выпуск 121

К. А. ТРАСКИН

РАДИОЛОКАЦИОННАЯ ТЕХНИКА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ







ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1951 ЛЕНИНГРАД

В брошюре излагаются физические основы радиолокации и принципы работы радиолокационных станций; описываются типовые узлы станций, а также рассказывается о применении радиолокационной техники в военном деле, в народном хозяйстве и в науке.

СОДЕРЖАНИЕ

Редактор *Е. М. Привальский* Техн. редактор *Л. М. Фридкин*

Сдано в произв. 28/III 1951 г. Подписано к печати 6/X 1951 г.
Бумага 82×108 1/32—1 1/2 бумажных—4,92 п. л. уч.-изд. л. 5,7
Т-06872 Тираж 25 000 Зак. 1128

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

Радиолокация — новый термин. Корнями его являются латинские слова: радио — излучаю и локус — место [1]. В современном понимании — это отрасль радиотехники, изучающая и разрабатывающая технические средства и методы определения местоположения различных объектов. Она основана на использовании отражения электромагнитных волн от препятствий, направленного излучения и приема электромагнитных волн, генерирования, излучения и приема импульсных сигналов, генерирования (и излучения) непрерывных сигналов и сравнения принимаемых сигналов, имеющих различные частоты или фазы.

Радиолокация — новейшая отрасль сравнительно молодой науки радиотехники, основоположником которой является наш великий соотечественник, ученый Александр Степанович Попов.

7 мая 1895 г. на заседании Русского физико-химического общества в Петербурге А. С. Попов продемонстрировал первую в мире аппаратуру радиосвязи. Так была открыта новая эра в истории мировой науки, техники и культуры. В 1945 г. в связи с 50-летием со дня изобретения радио А. С. Поповым правительство СССР установило ежегодный «День радио».

Роль радио особенно велика в нашей стране. В то время как в капиталистических странах радио, поставленное на службу агрессивным планам империалистов, стало оружием лжи и разжигания новой войны, в Советском Союзе оно служит задачам построения коммунистического общества, поли-

---

[1] За границей радиолокационные станции называют „радарами" — по первым буквам английских слов Radio Detection and Ranging, т. е. радиообнаружение и определение расстояния.

тического и культурного воспитания масс, великим целям борьбы за демократию и мир во всем мире.

По масштабам радиовещания, по уровню радиотехники и научно-исследовательских работ Советский Союз сейчас занимает первое место в мире. Советские ученые, продолжая дело А. С. Попова, открыли новые области применения радиоволн, утвердили приоритет нашей Родины во всех отраслях современной радиотехники.

Радиотехника получила широкое применение в различных отраслях народного хозяйства. В промышленности радио применяется для плавки металла и закалки токами высокой частоты; в железнодорожном транспорте радио является одним из главных видов связи, а в авиации и водном транспорте — единственно возможным способом связи; надежным средством связи стало радио и на полях наших колхозов и совхозов. Радиовещание, телевидение и другие области применения радио глубоко проникли в жизнь советских людей.

В науке — физике, астрономии, химии, метеорологии, геологии, медицине—широко применяют достижения радиотехники.

Большое значение радио имеет и в военном деле.

Место корабля, самолета, танка или другого объекта можно определить при помощи радиопеленгации. Этот способ известен давно и применялся в армии и флоте еще в первой мировой войне. Он находит применение и в настоящее время.

Но радиопеленгация обладает существенным недостатком. Работники пеленгаторных станций не смогут определить место самолета или корабля, если радиостанции последних не будут работать на передачу. Вот почему, идя в боевую операцию, корабль или самолет в целях сохранения тайны своего местонахождения не включает передающую радиостанцию или включает ее в исключительных случаях, на очень короткий промежуток времени, чтобы пеленгаторные станции не успели сделать засечек направления, как говорят, запеленговать радиостанцию.

Появление радиолокационных станций сыграло огромную роль в военном деле. Какие бы меры маскировки враг ни применял, ему не удастся обмануть зоркую бдительность радиолокатора. Туман, облачность, темнота и радиомаскировка не помогут врагу — радиолокационная станция обнаружит его почти при любых условиях.

Такими замечательными возможностями радиолокатор обязан свойству радиоволн отражаться от различных тел. Это явление было также открыто великим изобретателем радио А. С. Поповым летом 1897 г. при опытах по организации радиосвязи на Балтийском флоте.

В своем отчете об опытах по радиосвязи на Балтике в 1897 г. А. С. Попов писал[1]:

«...Наблюдалось также влияние промежуточного судна. Так, во время опытов между «Европой» и «Африкой» попадал крейсер «Лейтенант Ильин», и если это случалось при больших расстояниях, то взаимодействие приборов прекращалось, пока суда не сходили с одной прямой линии...».

Первое практическое применение радиоволн для целей обнаружения относится к 1904 г. Специальные радиоустановки уже в то время давали возможность обнаружить и определить глубину залегания в земле полезных ископаемых. Эти приборы работали на сравнительно длинных волнах.

Длинная волна огибает препятствие, а для обнаружения его с помощью отраженных волн надо, чтобы длина волны была меньше отражающего объекта или сравнима с ним. Поэтому радиолокационная техника могла развиться лишь с применением коротких волн.

Советские ученые внесли большой вклад в дело развития коротких, а затем и ультракоротких волн, на которых работают радиолокационные станции.

Опыты на ультракоротких волнах в Советском Союзе впервые начал в 1922 г. акад. Б. А. Введенский. В дальнейшем он изучал явление изменения силы приема, когда на пути распространения ультракоротких волн между передатчиком и приемником находились какие-либо предметы. В результате изучения этого явления были сделаны выводы о возможности использования его для обнаружения подвижных объектов.

Продолжая свои работы, акад. Б. А. Введенский в 1928 г. вывел очень важную формулу, определяющую дальность распространения ультракоротких радиоволн. Этой формулой пользуются и сейчас при определении дальности действия радиолокационных станций.

---

[1] „Изобретение радио А. С. Поповым", Сборник документов и материалов под редакцией А. И. Берга. Издательство Академии Наук СССР, 1945.

Начиная с 1923 г., короткие волны стали применяться для исследования высоких слоев атмосферы (ионосферы). Ионосферные радиостанции, используя явление отражения коротких волн от высоких ионизированных слоев атмосферы, определяли высоту этих слоев. В Советском Союзе впервые в мире для исследования ионосферы начали применять так называемую импульсную работу радиопередатчика. Такая установка была построена под руководством проф. М. А. Бонч-Бруевича в 1933 г.

Импульсная техника во многом содействовала появлению и развитию современных радиолокационных станций, а импульсная работа стала основным видом их работы.

Дальнейшему развитию радиолокационной техники также способствовали многочисленные исследования советских ученых и инженеров.

Некоторые теоретические основы радиолокационной техники были разработаны в Советском Союзе основателем советской школы радиоспециалистов акад. М. В. Шулейкиным.

Ряд ценных теоретических работ в области радиолокации и современной радионавигации сделали крупнейшие советские ученые академики Л. И. Мандельштам и Н. Д. Папалекси.

Интересно отметить, что толчок развитию радиолокации дали радиолюбители-коротковолновики. В 1920—1923 гг. они доказали пригодность для дальней связи волн короче 100 *м*, считавшихся до того «бросовыми». Радиостанции на коротких волнах имели большое преимущество — они требовали для дальней связи в сотни и тысячи раз меньше мощности, чем это требовалось на длинных волнах. Успехи коротковолновиков-любителей заставили обратить внимание специалистов на заброшенный диапазон радиоволн. Коротковолновая радиотехника начала бурно развиваться. Радиолюбителям были оставлены небольшие участки в коротковолновом диапазоне.

Однако на этих участках стало «тесно» и радиолюбителям отвели новый участок неиспользованных радиоволн, на этот раз в ультракоротковолновом диапазоне (короче 10 *м*).

Одновременно на этих же волнах стало развиваться телевидение. Эта новая отрасль радиотехники потребовала от промышленности более совершенных деталей, ламп и дру-

гого оборудования, которое во многом отличалось от такого же оборудования для средних и длинных волн.

Техника радиолокации на родине радио — в Советской России развивалась своим самостоятельным путем и непрерывно продолжает развиваться, делая громадные успехи.

Этим успехам мы в первую очередь обязаны нашей партии и правительству и его мудрому руководителю товарищу Сталину, с именем которого связаны все достижения Советского государства.

В 1941 г. группа научных работников Физико-технического института (Ю. Б. Кобзарев, П. А. Погорелко и Н. Я. Чернецов) была удостоена Сталинской премии за «изобретение прибора для обнаружения самолетов».

В минувшей мировой войне радиолокационная техника использовалась почти во всех родах войск. Особенно большую помощь радиолокационные станции оказывали корабельным артиллеристам в морском бою и артиллеристам-зенитчикам при отражении налетов вражеской авиации.

Использование радиолокационной техники повысило эффективность основных видов вооружения и позволило некоторые из них применить там, где раньше это было невозможно или мало эффективно.

В послевоенной сталинской пятилетке радиолокационная техника получает все большее применение в различных отраслях народного хозяйства и науки.

В ЧЕМ СУЩНОСТЬ РАДИОЛОКАЦИИ

ОТРАЖЕНИЕ РАДИОВОЛН

В основе радиолокации лежит явление отражения радиоволн (радиоэхо).

Напомним, в чем заключается явление звукового эхо. Если, например, у одной стороны ущелья издать короткий отрывистый звук, то звуковая волна, дойдя до другой стороны ущелья, отразится и через определенный промежуток времени вернется обратно в виде звукового эхо (фиг. 1). Это время легко определить по секундомеру. Зная, что звук в воздухе за 1 сек. проходит около $^1/_3$ *км* [1], можно определить ширину ущелья.

---

[1] Скорость звука в воздушной среде при температуре — 20° С 318 *м/сек* (1 144,8 *км/час*) и при температуре + 20° — 342,6 *м/сек* (1 233 *км/час*).

Допустим, что мы услышали эхо через 2 сек., это значит, что путь звуковой волны в обе стороны равен $^2/_3$ *км*, а ширина ущелья — $^1/_3$ *км*, или около 330 *м*.



Фиг. 1. Явление звукового эхо.

На использовании явления звукового эхо основана работа эхолотов — приборов, служащих для измерения морских глубин. Прибор этот устроен следующим образом.

Мощный излучатель звука, укрепленный в днище корабля, направляет звуковые импульсы вертикально вниз. Скорость распространения звуковых волн в воде почти в пять раз больше скорости звука в воздухе. Отразившись от дна моря, звуковые волны попадают в приемный аппарат, с помощью которого по интервалу времени между моментом излучения звуковых импульсов и моментом приема отраженных сигналов на индикаторе непрерывно определяется глубина моря.

Аналогично определяется расстояние и радиолокатором, с той разницей, что используется не звук, а радиоволна.

Физические процессы, происходящие при отражении электромагнитной энергии от различных тел, довольно сложны. Объясняются они следующим образом.

В простейшем случае, когда на пути распространения электромагнитной энергии встречаются проводящие тела, в них под влиянием электрического поля волны возникают переменные токи той же частоты, что и частота колебаний этой волны. Эти токи вызывают в окружающем пространстве вторичные электромагнитные волны, которые рассеиваются и отражаются во все стороны и принимаются радиолокационной станцией.

Более сложные физические явления происходят при отражении электромагнитной энергии от полупроводящих материалов и диэлектриков (изоляторов). Но и такие материалы также отражают падающую на них электромагнитную волну.

Земля, вода, лед, металл, дерево, живые организмы отражают электромагнитную энергию с различной интенсивностью, зависящей от вещества и поверхности отражающего тела, а также от длины волны электромагнитных колебаний.

Отражение электромагнитной энергии может быть рассеянным или зеркальным и происходит по известному закону оптики — угол падения равен углу отражения.

Для работы большинства радиолокационных станций необходимы некоторые условия. Во-первых, передатчики должны работать короткими «порциями» радиоволн; после каждого такого излучения передатчик мгновенно выключается и наступает пауза, в течение которой «порция» радиоволн должна дойти до объекта и вернуться обратно в виде эхо к приемнику.

Такой режим работы радиолокационных станций называют импульсным, а «порцию» радиоволн — импульсом.

Во-вторых, антенна радиолокационной станции должна излучать импульсы радиоволн узким пучком в определенном направлении.

Кроме радиолокационных станций с импульсным режимом работы существуют радиолокаторы с непрерывным излучением энергии. В этом случае отраженная от цели энергия возвращается к станции с несколько измененной по сравнению с излучаемым сигналом частотой. Это изменение частоты возникает вследствие движения отражающего объекта или создается искусственно.

В настоящее время широкое применение имеет импульсный метод работы.

МЕРА ВРЕМЕНИ В РАДИОЛОКАЦИИ

Известно, что скорость распространения радиоволн равна скорости распространения света в пустоте, а это наибольшая из всех известных скоростей в природе и равняется она 300 000 *км/сек*[1].

Скорость распространения электромагнитных волн с большой точностью измерили академики Л. И. Мандельштам и Н. Д. Папалекси с помощью нового, очень точного метода, разработанного ими в 1930 г.

В приведенном на предыдущей странице примере измерения морских глубин с помощью эхолота продолжительность звука должна быть малой. Чем меньше расстояние до отражающего препятствия, тем короче должен быть звук. Если звук будет длительным, то первые звуковые волны успеют дойти до отражающего препятствия и вернуться к месту излучения раньше, чем первоисточник успеет закончить излучение, и наблюдатель не услышит эхо.

В нашем примере звуковое эхо вернулось через 2 сек. Значит, длительность звука в этом случае должна быть меньше 2 сек. Это легко достижимо.

Совсем другие промежутки времени получаются при измерении расстояния при помощи радиоволн, скорость распространения которых почти в миллион раз больше скорости звука. Поэтому в радиолокации при измерении времени прихода радиоэхо даже самый лучший секундомер не сможет ничего отметить. Для радиоволн 1 сек. слишком большая единица.

Произведем простой цифровой подсчет.

Допустим, что отражающий объект, например самолет, находится на расстоянии 150 *км* от радиолокатора. Значит, радиоволна должна «пробежать» от радиолокационной станции до цели и обратно 300 *км,* для чего ей потребуется время, равное частному от деления величины пути на скорость распространения радиоволн

$$\frac{300\ км}{300\,000\ км} = \frac{1}{1\,000}\ сек.$$

---

[1] Более точно скорость электромагнитных волн в воздухе равна 299 820 *км/сек.*

Значит, в данном примере радиоволне требуется время в одну тысячную секунды или миллисекунду (*мсек*).

Допустим теперь, что путь равен всего 300 *м*, т. е. в тысячу раз меньше, чем в первом примере. Следовательно, и время прохождения радиоволны будет в тысячу раз меньше 1 *мсек*. Такой промежуток времени, равный одной тысячной миллисекунды или одной миллионной доле секунды, называется микросекундой (сокращенно *мксек*).

В радиолокации приходится иметь дело с миллисекундами, микросекундами и даже долями микросекунды. Одна микросекунда это очень маленькая величина; за такой промежуток времени самолет, летящий со скоростью 720 *км/час*, успеет пролететь всего лишь... $^{2}/_{10}$ доли миллиметра.

Конечно, такие маленькие промежутки времени никакие секундомеры измерить не могут, но для этого существуют другие, более совершенные приборы. Они измеряют время с точностью до десятых долей микросекунды. Эти приборы — электронно-лучевые трубки.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ

Мы уже говорили, что в радиолокации применяются ультракороткие волны (УКВ). Ультракороткие волны по своим физическим свойствам во многом похожи на световые волны и многие законы оптики справедливы для УКВ.

Это вполне понятно, так как природа радиоволн и световых волн одна и та же — и те и другие являются различными видами электромагнитных колебаний, отличаются они только длиной волны[1]. Длина световых волн измеряется микронами, т. е. тысячными долями миллиметра, а радиоволн — метрами, дециметрами, сантиметрами и миллиметрами.

Обычно радиолокационные станции работают в диапазоне метровых, дециметровых и сантиметровых волн.

Выбор УКВ диапазона для работы радиолокационных станций обусловливается следующими причинами.

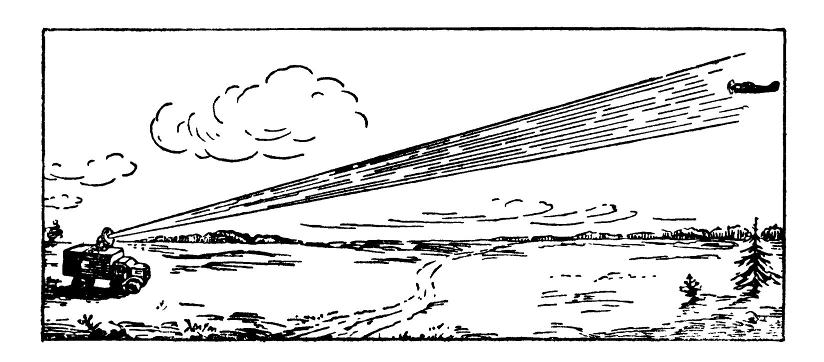
Для работы радиолокационной станции необходимо излучать электромагнитную энергию узким лучом, а для этого

---

[1] Видимый спектр световых волн лежит в пределах от 0,4 до 0,8 микрон; длина невидимых инфракрасных волн — от 0,8 до нескольких микрон, ультрафиолетовых — от 0,4 микрон и меньше.

длина волны должна быть мала по сравнению с размерами излучателя. Чем уже луч, тем больше при одной и той же длине волны должны быть размеры антенной системы.

Такое соотношение длины волны с размерами антенны сравнительно легко осуществляется ча ультракоротких волнах. Работа на дециметровых и сантиметровых волнах поз-



Фиг. 2. Луч электромагнитной энергии радиолокатора

волила применить радиолокационную технику на самолетах, где антенна должна быть малого размера.

Антенные системы для УКВ позволяют более просто сконцентрировать всю энергию радиолокационной станции и направить ее узким пучком, в виде луча прожектора (фиг. 2). Это необходимо для того, чтобы определить направление, откуда приходят отраженные сигналы, и тем самым узнать, где находится обнаруженный объект (цель).

Если бы энергия радиолокационной станции распространялась так же, как распространяются волны широковещательных станций, т. е. во все стороны, то это была бы непроизводительная трата мощности; до цели доходила бы очень маленькая доля всей затраченной энергии, а отраженный сигнал был бы очень слаб. Кроме того, не удалось бы обнаружить место, откуда пришел сигнал, так как он может вернуться с любого направления.

Ультракороткие волны, встретив на своем пути препятствие, соизмеримое с длиной волны, не огибают его, как это происходит с длинными волнами, а отражаются от препятствия. Большое влияние на интенсивность отраженного сиг-

нала оказывает соотношение длины волны с размерами цели. Особенно сильный отраженный сигнал приходит в том случае, когда размеры цели близки к половине длины волны. Такое соотношение для сравнительно небольших целей, какими являются самолет или корабль и их отдельные отражающие поверхности, легче осуществляется на УКВ.

Здесь мы указали на главные причины выбора УКВ диапазона для работы радиолокационных станций. Кроме указанных существует еще целый ряд технических и тактических причин, обусловливающих выбор той или иной волны УКВ диапазона для радиолокационных станций различного назначения.

Чтобы обнаружить цель, а затем определить ее азимут, т. е. направление на нее, радиолокационные станции должны иметь возможность при помощи узкого луча «осмотреть» окружающее пространство. Азимут цели измеряется в градусах. На наземных радиолокационных станциях азимутом называется угол между северным направлением меридиана и направлением на цель; на самолетных и морских радиолокационных станциях азимут отсчитывается между продольной осью самолета или корабля и целью.

Для обнаружения цели при круговом поиске антенна радиолокационной станции должна вращаться вокруг своей оси в горизонтальной плоскости или качаться в пределах заданного сектора при поиске в одном нужном направлении. В этом случае говорят, что станция ведет поиск по азимуту.

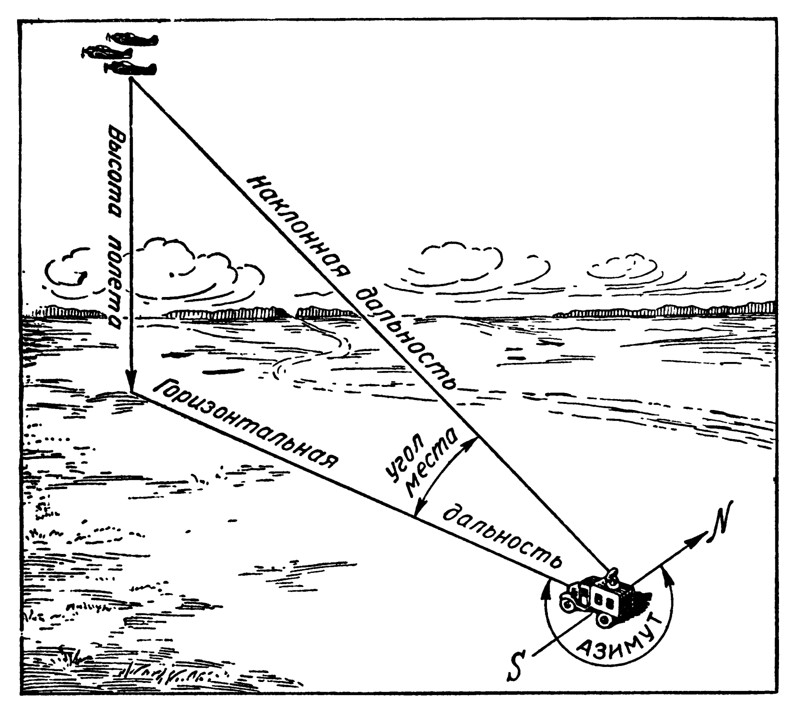
Для обнаружения морских или наземных целей достаточно вращения антенн в горизонтальной плоскости. Если же станция ведет обнаружение воздушных целей, то кроме вращения по азимуту необходимо перемещать луч по вертикали.

Такое перемещение луча в пространстве дает возможность определить угол места цели (фиг. 3), а зная этот угол и наклонную дальность, нетрудно определить высоту полета самолета.

В простейшем случае направление на объект определяется следующим образом.

Вращающаяся антенна «просматривает» заданное пространство. Если на пути распространения радиоволн никаких отражающих объектов нет, то волны уходят в пространство. Как только на их пути встретится отражающее тело, часть отраженной энергии вернется в приемник и после уси-

ления попадет в индикатор, где сигнал можно увидеть на экране электронно-лучевой трубки. Отраженный сигнал будет виден на экране всякий раз, когда антенна при своем вращении окажется направленной в сторону отражающего объекта. Желая уточнить направление (азимут), оператор



Фиг. 3. Координаты, определяемые радиолокационной станцией.

радиолокационной станции останавливает вращение антенны в том положении, когда обнаружен отражающий объект, и по величине отраженного импульса уточняет направление антенны.

С вращающейся антенной связана стрелка прибора-индикатора азимута, шкала которого имеет градусные деления, как в компасе. При установке радиолокационной станции направление антенны и стрелки индикатора должны строго совпадать. Таким образом, когда антенна направлена точно

на отражающий объект, стрелка на индикаторе указывает его азимут.

Существуют станции, где антенна вращается непрерывно, а азимут цели и расстояние до нее отсчитываются на одном индикаторе автоматически.

Подводя итоги изложенному выше, мы можем сказать, что работу радиолокационных станций характеризует следующее:

1. Действие почти всех радиолокационных станций основано на принципе отражения радиоволн.

2. При помощи направленных антенн электромагнитная энергия концентрируется в узкий луч, что позволяет определять направление на нужный объект.

3. Передатчик работает на ультракоротких волнах, которые, распространяясь прямолинейно, не огибают препятствия, а отражаются от них, если размеры препятствия больше или соизмеримы с длиной волны.

4. Радиолокационная станция работает в импульсном режиме, который позволяет сосредоточить в кратковременном импульсе мощный сигнал электромагнитной энергии, излучаемой антенной в нужном направлении, а в промежутках между излучениями принимать с того же направления и на одну и ту же антенну отраженный сигнал.

5. По скорости распространения электромагнитных волн в пространстве и по времени прихода отраженного от объекта радиоэхо определяется длина пути, пройденного электромагнитной волной до отражающего тела, т. е. расстояние до него.

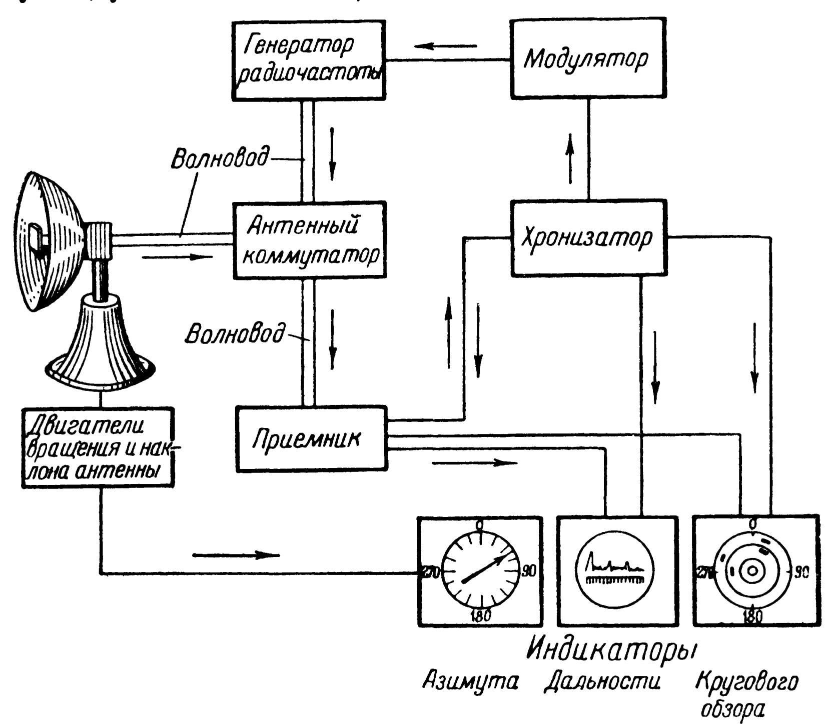
Первые радиолокационные станции полностью отвечали своему названию, так как они служили только для обнаружения цели и определения ее местонахождения.

В настоящее время радиосвязь и радиолокация так тесно переплелись, что зачастую трудно провести границу между ними. Очень часто станцию, где применяется только один из вышеприведенных признаков работы радиолокационной станции, например импульсная работа передатчика, называют радиолокационной.

О различном применении радиолокационной техники мы будем говорить несколько позже. Теперь же нам необходимо познакомиться с принципом работы отдельных узлов, которые имеются в каждой станции в различном конструктивном оформлении.

ИЗ ЧЕГО СОСТОИТ РАДИОЛОКАЦИОННАЯ СТАНЦИЯ И КАК ОНА РАБОТАЕТ

На фиг. 4 изображена скелетная схема радиолокационной станции дальнего обнаружения самолетов. Схема дана в самом общем виде. В отдельных типах станций некоторых узлов, указанных в схеме, может и не быть.



Фиг. 4. Скелетная схема радиолокационной станции.

Назначение узлов станции следующее.

Антенная система излучает вырабатываемую передатчиком электромагнитную энергию в виде направленного луча и принимает энергию, отраженную от цели.

Волновод, двухпроводная или коаксиальная линия (выбор зависит от длины волны) служат для передачи энергии высокой частоты от передатчика к антенне или от антенны к приемнику.

Электрические двигатели служат для вращения антенной системы вокруг оси и для изменения угла наклона антенны по вертикали.

Антенный коммутатор, или переключатель, защищает приемник от мощного импульса передатчика и подключает антенну к передатчику в момент излучения, а в промежутки времени между излучениями импульсов отключает передатчик и подключает антенну к приемнику для приема отраженных импульсов.

Хронизатор через строго определенные интервалы времени вырабатывает слабые пусковые импульсы нужной формы и длительности, которыми задается через модулятор частота повторения и длительность импульсов мощного передатчика (генератора высокой частоты); одновременно он дает пусковой импульс в индикаторное устройство.

Модулятор усиливает слабые пусковые импульсы хронизатора, придает им окончательную форму и посредством этих импульсов модулирует, т. е. управляет высокочастотными колебаниями генератора высокой частоты (мощного передатчика).

Генератор высокой частоты начинает работать в момент подачи на него импульса от модулятора и через антенну излучает в пространство мощный кратковременный импульс высокочастотной энергии, продолжительность которого равна времени действия импульса ог модулятора, после чего передатчик прекращает излучение на сравнительно длительный отрезок времени, до получения следующего импульса от модулятора.

Приемник усиливает слабые отраженные импульсы высокочастотной энергии, принятые антенной, преобразует эти сигналы, превращая их из высокочастотных в видеочастотные [1], усиливает их и подает на соответствующие индикаторы.

Индикатор азимута связан с вращающейся антенной и показывает направление (азимут) на отражающий объект.

---

[1] Видео- происходит от глагола video — видеть.

Видеочастота применяется в телевидении и радиолокации для передачи электрических сигналов, видимых на экране электронно-лучевой трубки.

Видеочастота в радиолокации лежит в диапазоне от 50 — 1 000 *гц* до 1—2 *мггц*

Индикатор дальности служит для воспроизведения на экране электронно-лучевой трубки отраженного от цели и усиленного приемником импульса, по которому на шкале индикатора отсчитывается дальность до цели.

Индикатор кругового обзора служит для одновременного наблюдения за всеми целями, находящимися в районе обзора радиолокационной станции, и для непрерывного определения их дальностей и азимутов.

Индикатор угла места или высоты цели применяется на радиолокационных станциях, обнаруживающих только воздушные цели.

Все указанные индикаторы не всегда устанавливаются на радиолокационных станциях. В отдельных типах станций тот или иной индикатор может отсутствовать или дублируется; в последнем случае индикаторы, установленные в различных местах, дают одно и то же показание. Такие условия часто встречаются на кораблях и самолетах.

Кроме указанных основных узлов каждая радиолокационная станция, если она не питается от сети, имеет первичный источник электрической энергии, состоящий обычно из двигателя внутреннего сгорания и генератора переменного тока. Вырабатываемое генератором напряжение трансформируется до нужных величин, выпрямляется в спецальных выпрямителях и подается для питания отдельных узлов радиолокационной станции.

Теперь перейдем к более подробному описанию типовых блоков и узлов радиолокационных станций и расскажем о принципе их работы.

ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ (КАНАЛИЗАЦИЯ ЭНЕРГИИ УКВ)

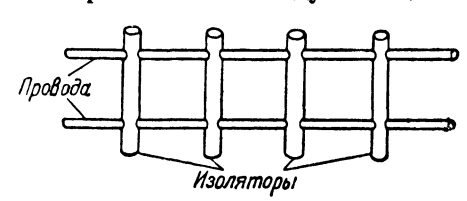
Энергия высокой частоты от передатчика должна поступать в антенную систему, а колебания, принятые антенной, должны передаваться в приемник.

В диапазоне метровых волн для передачи энергии от передатчика к антенне и от антенны к приемнику применяется двухпроводная линия, состоящая из двух параллельных проводников, укрепленных при помощи изоляторов (фиг. 5) на некотором расстоянии друг от друга.

Передача энергии по открытым передающим линиям представляется как распространение электромагнитного по-

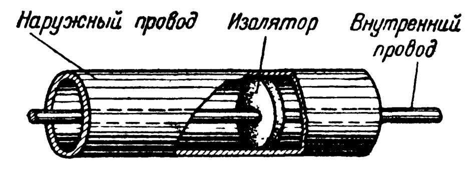
ля в пространстве, окружающем провода линии, которые служат лишь осью, направляющей эту энергию.

При передаче энергии от передатчика к антенне линия не должна излучать. Это достигается выбором соответствующих диаметров проводников и расстояния между ними. Все же часть электромагнитной энергии бесполезно рассеивается в пространстве.



Фиг. 5. Двухпроводный фидер.

Двухпроводная открытая линия непригодна для более коротких волн, так как в этом случае велико вредное излучение линии, кроме того, укорочение волны вызывает необходимость уменьшения расстояния между проводниками, что при передаче большой мощности может привести к пробою между ними. Поэтому для волн короче 3—4 *м* энергия подводится по коаксиальной линии.



Фиг. 6. Коаксиальный фидер.

Коаксиальная[1] линия представляет собой медную жилу, провод или трубку, располагаемую внутри наружного проводника, имеющего форму трубки. Центральная жила внутри трубки может быть укреплена при помощи шайб из хорошего диэлектрика (изолятора), в некоторых случаях внутреннее пространство линии заполняется специальным изолирующим составом. На фиг. 6 изображена линия, у которой центральная жила укреплена на изоляторах.

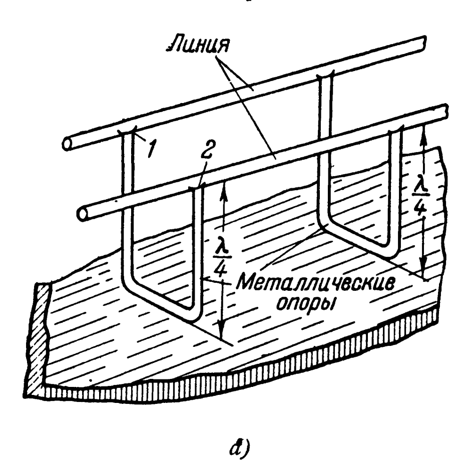
Однако и такая линия с укорочением волны становится плохой передающей линией, так как при этом увеличиваются потери в изоляторах.

Какой же выход из этого положения? Выход был найден очень простой и на первый взгляд даже парадоксальный. Изоляторы заменили металлом, т. е. хорошим проводником электричества.

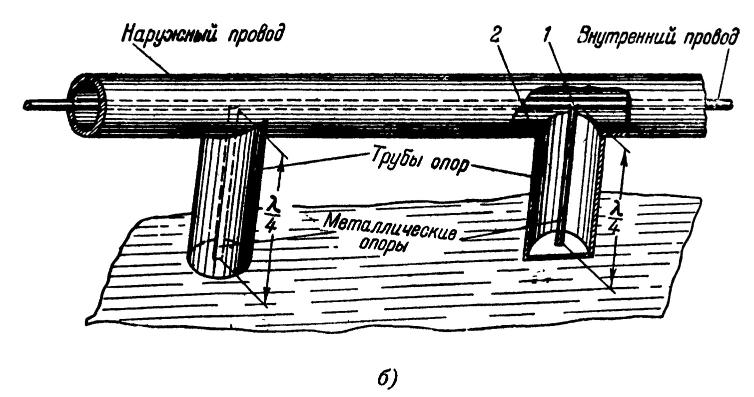
---

[1] Коаксиальное расположение проводов или трубок —это такое, при котором оси их совпадают.

Дело в том, что отрезок короткозамкнутой на конце линии, равной одной четверти длины электромагнитной волны, имеет бесконечно большое сопротивление.



а)



б)

Фиг. 7. Четвертьволновые металлические опоры.
а — для двухпроводной линии; *б* — для коаксиальной линии.

Для высокочастотного тока, проходящего по двухпроводной (фиг. 7, *а*) или коаксиальной линии (фиг. 7, *б*), между точками *1* и *2* отрезки четвертьволновых линий (металлические «изоляторы») представляют бесконечно большое сопротивление. Вот почему высокочастотная энергия, проходящая

по двухпроводной или коаксиальной линии, не ответвляется через металлические «изоляторы» длиной в четверть волны.

Указанное положение справедливо лишь в том случае, когда отрезок линии (металлический «изолятор») точно равен $^1/_4$ длины волны или нечетному числу четвертей волны высокочастотных колебаний, передаваемых по линии.

Воспользовавшись таким свойством четвертьволнового металлического «изолятора», можно изготовить коаксиальную линию, в которой вместо изоляторных шайб внутренний провод линии будет поддерживаться металлическими опорами, равными $^1/_4$ длины волны; тогда потерь в «изоляторах» не будет. Такая линия применяется при передаче высокочастотной энергии с длиной волны не короче 10 *см*.

При дальнейшем укорочении волны возникают другие трудности передачи энергии. С укорочением волны диаметр наружной трубки и длина металлических «изоляторов» уменьшаются; максимальный допустимый диаметр линии становится слишком малым, чтобы передать достаточную мощность, и в этом случае возникает дуговой пробой между внутренним проводником линии и наружной трубкой.

Для передачи энергии на волнах сантиметрового диапазона применяют «волноводы», представляющие собой обычные металлические трубки круглого или прямоугольного сечения.

Возможность передачи электромагнитной энергии по трубам была известна давно, но этот способ не применялся, так как размер поперечного сечения трубы при сравнительно длинных волнах получается слишком большой. Так, например, для радиоволны длиной в 10 *м* ширина прямоугольного волновода должна быть больше 5 *м*.

Применение волновода стало целесообразным на сантиметровых волнах.

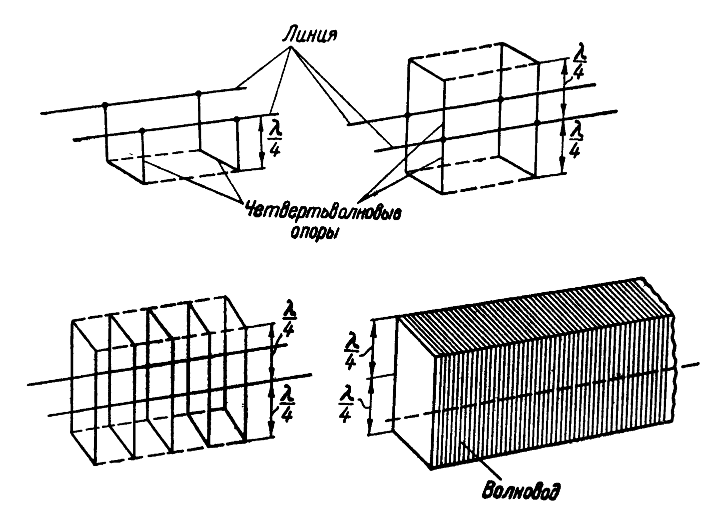
Впервые применение труб для передачи электромагнитной энергии было осуществлено в Советском Союзе акад. Б. А. Введенским и проф. М. А. Бонч-Бруевичем.

Волновод можно представить как прямоугольную металлическую трубу, стенки которой образованы большим числом расположенных вплотную друг к другу металлических опор, каждая из которых имеет длину в четверть волны (фиг. 8).

Волноводы обладают весьма малыми потерями, так как они не имеют изоляторов и, кроме того, не рассеивают энергию в пространство.

Распространение электромагнитных волн внутри волновода можно сравнить с распространением звуковых волн в переговорных трубах. Электромагнитные волны, многократно отражаясь от стенок волновода, распространяются вдоль его оси.

Здесь необходимо отметить, что электромагнитная волна в волноводах распространяется не по проводящим электрическим металлическим стенкам, а по диэлектрику, находящемуся внутри волновода. Этим диэлектриком, обладающим наименьшими потерями, является воздух.



Фиг. 8. Образование волновода.

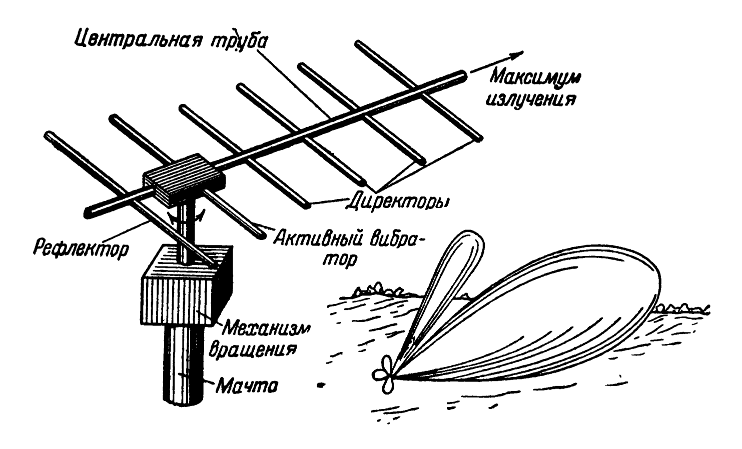
АНТЕННЫЕ СИСТЕМЫ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ

Антенны радиолокационных станций в зависимости от длины волны радиолокатора и его назначения бывают различных типов. Одной из распространенных антенн, работающих на метровом диапазоне волн, является директорная антенна (фиг. 9). Она состоит из ряда отдельных антенн, называемых полуволновыми вибраторами: длина их равна

приблизительно половине длины волны. Все вибраторы укреплены на одном центральном стержне на определенном расстоянии друг от друга, зависящем от длины волны.

Такая антенна обеспечивает однонаправленность излучения (и приема), очень проста в изготовлении и удобна для подвижных радиолокационных станций. Она дает довольно узкий пучок волн в одном направлении и небольшие по мощности боковые паразитные лепестки. Форма диаграммы излучения показана на фиг. 9.

На фиг. 9 видно, что директорная антенна состоит из одного активного вибратора, к которому подводится энергия



Фиг. 9. Директорная антенна и ее диаграмма излучения.

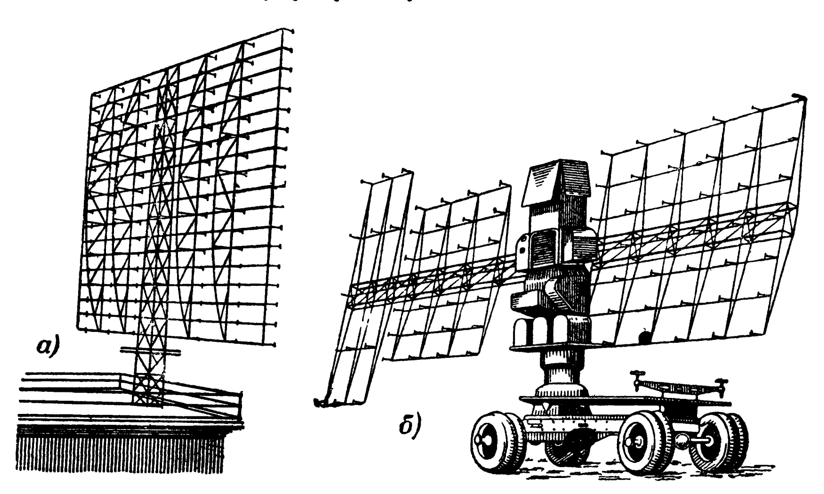
высокой частоты от передатчика. Другие вибраторы антенны не получают питания, но при соответствующем расстоянии от активного вибратора и между собой оказывают направленное действие на излучение.

Вибратор, расположенный позади активного вибратора, отражает радиоволны, служит как бы зеркалом, поэтому его называют рефлектором. Рефлектор делается несколько длиннее активного вибратора.

Вибраторы, расположенные впереди активного вибратора, увеличивают концентрацию энергии в свою сторону, как бы направляют энергию, «распоряжаются» ею. Отсюда они и получили свое название директоров. Длина директора несколько меньше активного вибратора.

Директорная антенна может располагаться на мачте, где так же устанавливается электродвигатель и механизм вращения антенны.

Существуют и другие типы антенных систем для метровых волн, более сложной конструкции. Все они служат для создания узкого луча электромагнитной энергии, и чем уже должен быть луч, тем больше будет вибраторов и, следовательно, больше будут размеры антенной системы. Конечно,



Фиг. 10. Антенная система станций метрового диапазона, *а*—стационарная; *б*—подвижная.

это справедливо только для одной длины волны, ибо общие размеры антенны зависят также от длины волны: чем длиннее волна, тем больше размеры антенной системы.

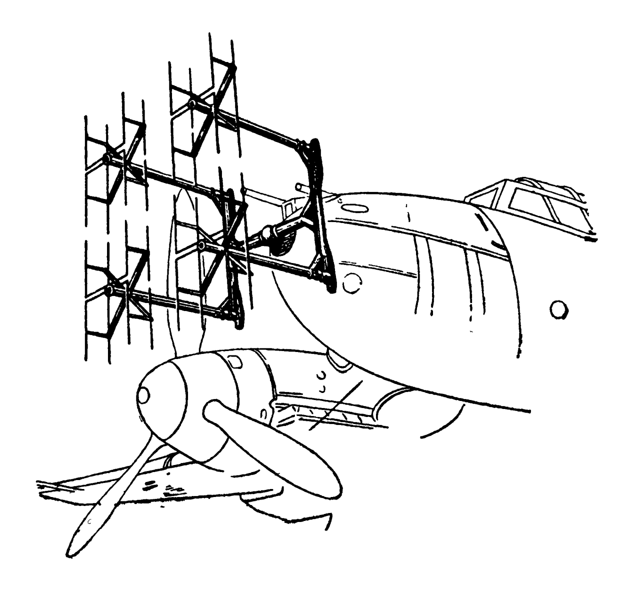
На фиг. 10, *а* и *б* даны общие виды антенных систем радиолокационных станций метрового диапазона. На фиг. 10,*а* показана антенная система стационарной, а на фиг. 10, *б* подвижной радиолокационных станций.

Такие направленные антенные системы, состоящие из большого числа параллельно расположенных вибраторов длиной в полволны каждый, впервые в мире предложили и разработали наши советские ученые сотрудники Нижегородской радиолаборатории М. А. Бонч-Бруевич, В. В. Татаринов, А. А. Пистолькорс и другие.

Чем короче волна радиолокационной станции, тем меньше размеры излучателя. Это особенно важно для самолет-

ных радиолокационных станций. Радиолокационные самолетные станции, работавшие на волнах метрового диапазона, имели громоздкую антенную систему (фиг. 11). Такие антенны уменьшали скорость самолета и ухудшали его маневренность.

Применение сантиметровых волн позволило значительно уменьшить размеры излучателей. Для получения узкого на-

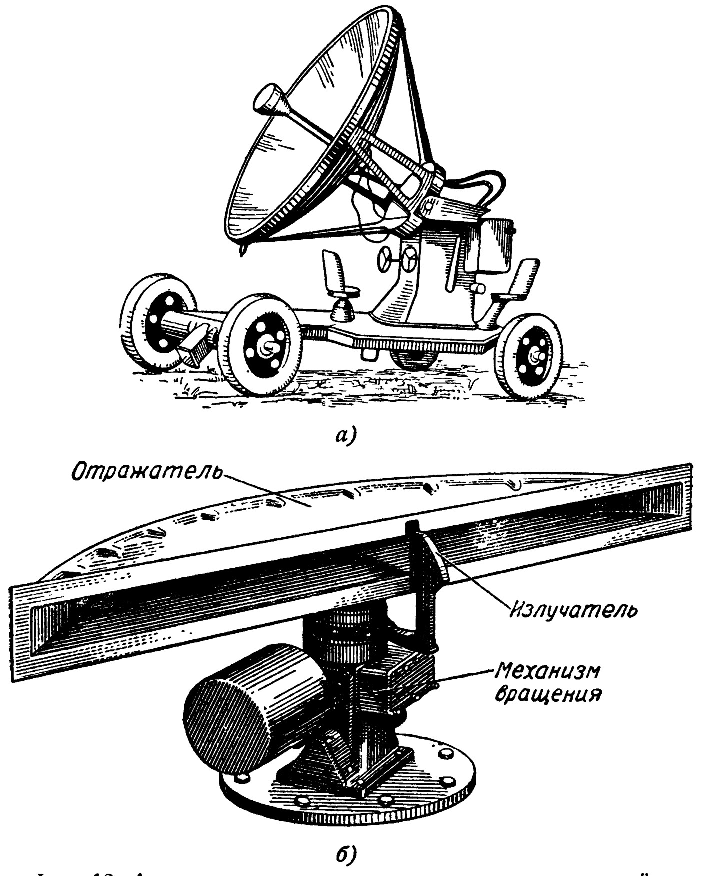


Фиг. 11. Самолетная антенна станции метрового диапазона.

правленного пучка радиоволн стали применять отражатели (рефлекторы), подобные рефлекторам прожекторных станций. Рефлекторы для радиолокационных антенн изготовляются из металла или из металлической сетки (фиг. 12,*а*). В фокусе такого отражателя (параболического зеркала) устанавливается полуволновой вибратор или открытый конец волновода (фиг. 12,*б*). Радиоволны, попадая на рефлектор и отражаясь от него, излучаются в пространство узким пучком.

При одной и той же волне, чем больше размеры рефлектора по ширине или высоте, тем уже будет луч в тех же направлениях.

Пользуясь таким свойством рефлектора, пучку волн можно придать любую форму. На фиг. 13 показаны две формы излучения волн, получаемые на антеннах различного типа

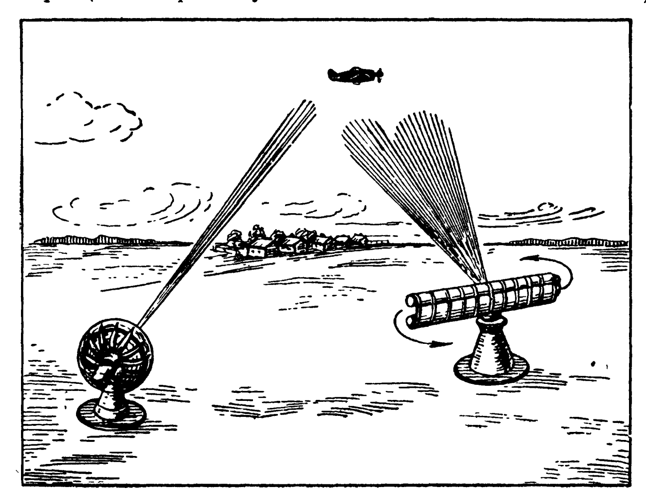


Фиг. 12. Антенная система радиолокационных станций
а—с вибратором (дециметрового диапазона); *б*—с волноводом (сантиметрового диапазона).

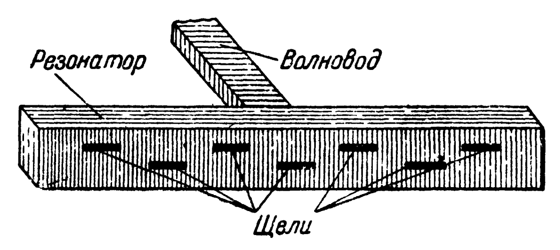
В настоящее время для сантиметровых волн применяются и другие типы антенн, также обладающие направленным действием. Одним из таких типов является щелевая или дифракционная антенна, которую впервые предложили у нас в Советском Союзе в 1938 г. независимо друг от друга проф. М. А. Бонч-Бруевич и М. С. Нейман. Теорию щеле-

вых антенн разработали член-корреспондент Академии наук Союза ССР А. А. Пистолькорс и доктор техн. наук Я. Н. Фельд.

Принцип работы щелевой антенны заключается в следующем. Если в одной из стенок волновода или объемного резонатора (о котором будет сказано несколько позже) сде-



Фиг. 13. Формы диаграмм излучения.

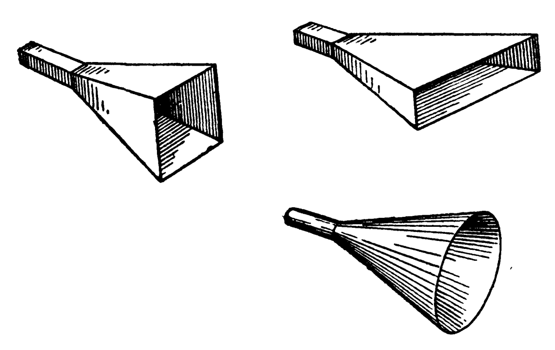


Фиг. 14. Щелевая антенна.

ланы небольшие прямолинейные щели или круглые отверстия определенных размеров, согласованных с длиной волны, то существующее внутри полости электромагнитное поле будет излучаться во внешнее пространство. Поэтому такие щели могут рассматриваться как особого рода антенны. Щелевые антенны обладают хорошей направленностью и просты в изготовлении.

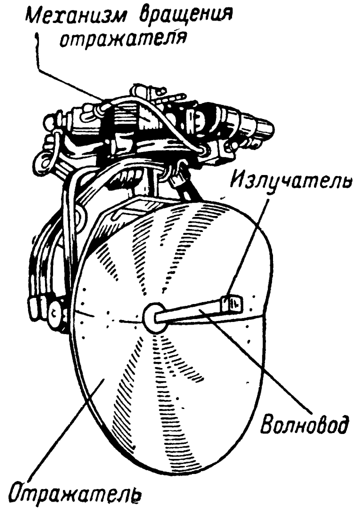
На фиг. 14 приведен общий вид щелевой антенны.

В радиолокационной технике применяются также рупорные и диэлектрические антенны, обладающие хорошим направленным действием.



Фиг. 15. Различные формы рупорных антенн.

Если конец волновода открыт, электромагнитная волна излучается в пространство в определенном направлении. Лучший результат получается, если открытый конец волновода оканчивается расширяющимся рупором. Применяются квадратная, прямоугольная и круглая формы рупорных антенн (фиг. 15).



Фиг. 16. Самолетная радиолокационная антенная система.

Для хорошего направленного действия размеры стенок раструбов рупорных антенн должны быть согласованы с длиной волны.

Иногда открытый конец волновода, оканчивающийся щелями или рупором, располагается у параболического рефлектора, на который излучается электромагнитная энергия и отражается от него узким пучком в нужном направлении.

Существуют и другие конструкции излучателей, но все они служат для передачи энергии из волновода в пространство или передачи принятой энергии к приемнику.

На фиг. 16 показана антенная система самолетной радиолокационной станции, работающей в сантиметровом диапазоне. На фигуре виден подводящий энергию волновод, излучатель и параболический рефлектор.

Как видно из приведенных фигур, антенны для УКВ, особенно для сантиметрового диапазона, очень мало похожи на антенны, применяемые для волн широковещательного диапазона.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ ВРАЩЕНИЯ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ

Нельзя знать заранее, с какого направления появится враг, поэтому радиолокационная станция обнаружения должна просматривать все окружающее пространство, т. е. иметь круговой обзор. Для этого антенная система радиолокационной станции должна вращаться вокруг своей вертикальной оси, постепенно «осматривая» своим лучом окружающее пространство.

В некоторых случаях необходимо «осматривать» только определенный сектор пространства, для чего антенная система должна совершать движение в заданном секторе.

При поиске, обнаружении и наблюдении за самолетом антенная система кроме кругового или секторного движения может совершать вертикальное движение вверх и вниз.

Все указанные движения антенной системы совершаются при помощи электрических двигателей, управляемых с пульта управления радиолокационной станции или автоматически.

АНТЕННЫЕ КОММУТАТОРЫ

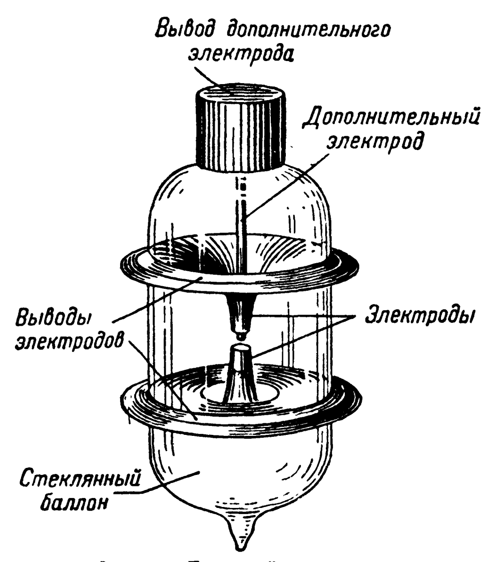
Первые радиолокационные станции работали с двумя антеннами: одна служила для передачи, другая — для приема.

Советские ученые первыми осуществили передачу и прием радиолокационных сигналов на одну антенну. Теперь почти все радиолокационные станции работают только с одной антенной.

Мы уже говорили, что при импульсной работе радиолокационной станции происходит кратковременное излучение мощного импульса электромагнитной энергии, после чего наступает сравнительно длинная пауза. Во время этой паузы импульс энергии продолжает свой путь в пространство, и

если на его пути встретится какое-либо отражающее тело, то энергия отразится от него, часть ее возвратится к антенне и будет принята приемником.

Обычно в радиолокационных станциях применяется одна антенна, поэтому ее необходимо переключать с приема на передачу и обратно. В радиолокационных станциях в зависимости от их назначения длительность импульсов бывает от 0,1 до 50 *мксек*, а повторяются они от 50 до 5 000 раз в секунду. Конечно, при такой частоте повторения (посылок) импульсов никакой механический переключатель не успеет переключать антенну.



Фиг. 17. Газовый разрядник.

Советские инженеры предложили для этой цели использовать газовый разрядник.

Для коммутаторов радиолокационных станций, работающих в сантиметровом диапазоне, применяется газовый разрядник, изображенный на фиг. 17. Разрядник помещают в особую камеру, называемую объемным резонатором.

Газовый разрядник заключен в стеклянный баллон. Внутри баллона находятся два конических электрода, образующих искровой промежуток. Дисковые выводы этих электродов впаяны в стеклянный баллон, а вывод дополнительного электрода подан на цоколь.

Баллон разрядника наполнен разреженным газом при давлении около 1 *мм* рт. ст.

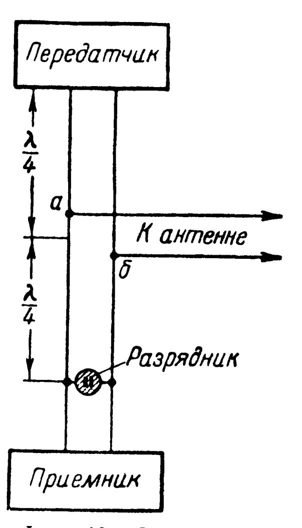
Действие газового разрядника заключается в мгновенном замыкании и размыкании цепи, в которую он включен. Замыкание цепи в газовом разряднике происходит через искровой промежуток между коническими электродами, когда под действием мощного импульса передатчика радиолокатора

газовый разрядник «загорается» и сопротивление промежутка между электродами становится небольшим.

Дополнительный вспомогательный электрод, на который подается постоянное напряжение, близкое к напряжению зажигания, служит для ускорения процесса ионизации газа (зажигания разрядника). В современных газовых разрядниках время «зажигания» очень мало и доходит до 0,01 *мксек*. Несколько большее время требуется для деионизации газа, т. е. для того, чтобы лампа «погасла».

Таким образом, газовый разрядник может в очень малые промежутки времени замыкать и размыкать цепь, при этом цикл его работы будет строго соответствовать работе импульсного генератора радиолокационной станции.

Рассмотрим принцип действия простейшего антенного коммутатора для радиолокационных станций метрового диапазона.



Фиг. 18. Схема антенного коммутатора.

Газовый разрядник включается в линию, питающую приемник, на расстоянии четверти волны от точек *а* и *б*, как показано на фиг. 18. Длина линии от этих же точек до передатчика также равна четверти волны. Во время излучения мощного импульса энергия, созданная передатчиком, действует на газовый разрядник, который «зажигается» и замыкает цепь, где он включен. Таким образом, «горящий» разрядник создает отрезок короткозамкнутой четвертьволновой линии, представляющей собой бесконечно большое сопротивление, и почти вся энергия, минуя приемник, направляется по линии в антенну.

Во время паузы, как только передатчик перестал генерировать, разрядник «гаснет» и размыкает четвертьволновую линию. Принятый антенной слабый отраженный импульс не может «зажечь» разрядник, и энергия отраженного импульса беспрепятственно попадает в приемник. Кроме того, другая короткозамкнутая четвертьволновая линия между точками *а* и *б* и передатчиком, входное сопротивление которого мало, не дает возможности слабому отраженному сигналу от-

ветвиться в сторону передатчика, и сигнал целиком попадает в приемник.

Таким образом, при помощи газового разрядника и четвертьволновой линии осуществляется коммутация антенны или точнее поочередная защита приемника и блокировка передатчика при работе на одну и ту же антенну.

Здесь мы рассказали о работе простейшего коммутатора для метровых волн. Для радиолокационных станций сантиметрового диапазона в качестве коммутатора применяются газовые разрядники с резонаторами, устанавливаемыми внутри волновода. Конструкция их более сложна, но принцип работы тот же.

ХРОНИЗАТОР И МОДУЛЯТОР

Хронизатор — очень важный узел радиолокационной станции. В схеме хронизатора вырабатываются «пусковые импульсы». Эти импульсы управляют работой всей станции, они следуют с заданной частотой, которая определяет частоту повторения импульсов, излучаемых радиолокационной станцией.

Из хронизатора пусковые импульсы поступают в модулятор, где они приобретают нужную форму и величину амплитуды, и затем направляются в генератор ультравысокой частоты, генерирующий только в момент поступления пусковых импульсов от модулятора.

Кроме того, пусковой импульс поступает в индикатор, где одновременно с излучаемым импульсом начинает работать развертка электронно-лучевой трубки индикатора, при помощи которого производится отсчет времени прихода отраженного импульса (подробно о работе индикатора будет сказано ниже).

В некоторых схемах пусковой импульс поступает также в приемник и регулирует его чувствительность. Это необходимо вследствие того, что от близко расположенных объектов может вернуться слишком мощный импульс отраженного сигнала, который повредит приемник. Поэтому в начале излучения импульса передатчиком приемник должен быть заперт, а по мере распространения импульса чувствительность приемника должна повышаться.

У большинства хронизаторов основным элементом является генератор, работа которого стабилизируется кварцем. Такой генератор обеспечивает частоту повторения импуль-

сов с большой заданной точностью по времени. В качестве примера точности работы хронизатора можно указать, что ошибка в синхронизации импульсов на наземных навигационных станциях не превышает 1 *мксек* за 20 *мин.* Это очень большая точность. Часы, идущие с такой точностью, дали бы за 40 лет ошибку всего в 1,3 *сек.*

ИМПУЛЬСНАЯ РАБОТА ПЕРЕДАТЧИКА

Мы уже говорили, что большинство радиолокационных станций работает в импульсном режиме. Это такая работа передатчика, когда он излучает в очень короткий промежуток времени мощный импульс энергии ультравысокой частоты; после такого излучения наступает сравнительно длинный перерыв — пауза, во время которой происходит прием отраженного сигнала. Затем опять повторяется импульс излучения, за ним пауза и т. д.

В зависимости от назначения радиолокационной станции длительность импульса, его мощность и частота повторений, с которой следуют импульсы один за другим, так же как и длина волны или частота колебаний ультравысокочастотного генератора, бывают различны.

Приведем некоторые данные, характеризующие работу радиолокационных станций.

Мощность излучения для станций различного назначения колеблется от нескольких десятков ватт до 1 000 *квт* в импульсе и даже более.

Длительность импульсов — в пределах от 0,1 до 50 *мксек.*

Частота повторений (посылок) импульсов бывает от 50 до 5 000 раз в секунду. Частоту посылок принято обозначать в герцах (*гц*).

Для того чтобы иметь ясное представление об импульсной работе, приведем небольшой пример. Допустим, что радиолокационная станция работает на волне 10 *см*; мощность в импульсе $P_{имп} = 20$ *квт*; длительность импульса $\tau = 10$ *мксек*; частота повторения импульсов $F = 500$ *гц*.

Для того чтобы построить график импульсной работы, надо подсчитать, чему будет равен период T частоты повторения импульсов.

Как известно, период и частота связаны такой формулой

$$T = \frac{1\ сек.}{F}.$$

В нашем примере период повторения импульсов

$$T = \frac{1\ \text{сек}}{500} = \frac{1\,000\,000\ \textit{мксек}}{500} = 2\,000\ \textit{мксек}.$$

Теперь подсчитаем, какая частота или какое число колебаний в секунду соответствует длине волны 10 *см*.

Частота колебаний f, длина волны λ и скорость распространения радиоволн c, равная 300 000 *км/сек*, связаны формулой

$$f = \frac{c}{\lambda}.$$

В нашем примере $\lambda = 10$ *см*. Взяв c в сантиметрах и подставляя эти данные в формулу, получим:

$$f = \frac{30\,000\,000\,000}{10} = 3\,000\,000\,000\ \textit{гц},$$

или $3 \cdot 10^9$ *гц*.

Теперь подсчитаем, сколько таких высокочастотных колебаний успеет произойти в течение одного импульса, т. е. за 10 *мксек*. Для этого нужно частоту f поделить на число микросекунд, содержащихся в 1 *сек*, и умножить на 10:

$$\frac{3\,000\,000\,000 \cdot 10}{1\,000\,000} = 30\,000 \text{ полных колебаний.}$$

На основании полученных результатов изобразим графически импульсную работу.

По горизонтальной оси времени отложим длительность импульса в 10 *мксек*. Примем масштаб: 1 *мм* = 1 *мксек*. Значит, ширина импульса в принятом нами масштабе будет равна 10 *мм*.

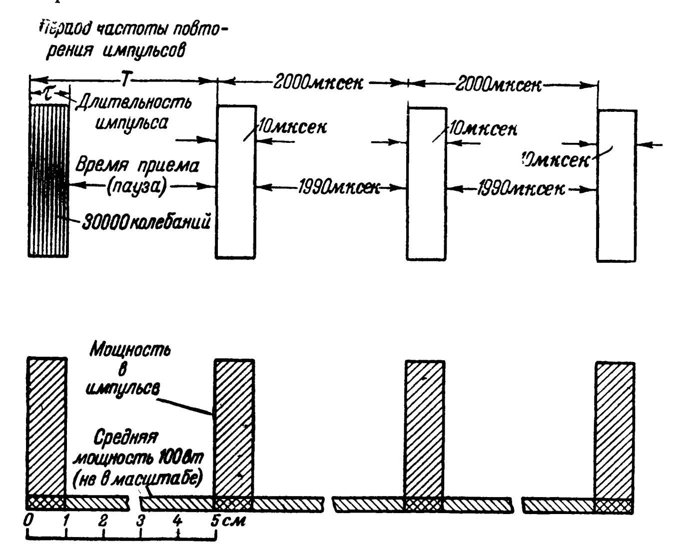
Следующий импульс начнется в нашем примере через 2 000 *мксек*. Следовательно, его надо отложить через 2 000 *мм*, т. е. через 2 *м* от начала первого импульса. Изобразить это на бумаге невозможно и нам придется нарушить принятый масштаб.

За время импульса, равное 10 *мксек*, количество полных высокочастотных колебаний равно 30 000. В принятом нами масштабе этого также изобразить нельзя.

По вертикальной оси графика будем откладывать мощность. Примем масштаб, по которому 2 *мм* соответствуют 1 *квт* мощности. Форму импульса будем считать прямоугольной, что близко к действительности.

Тогда графически импульсную работу с данными нашего примера можно изобразить так, как это представлено на фиг. 19, но необходимо помнить, что по оси времени дважды нарушен масштаб, по причинам, указанным выше.

Теперь разберем вопрос о мощности. Когда широковещательная радиостанция имеет мощность в антенне 150 *квт*,



Фиг. 19. Графическое изображение импульсной работы.

то для ее питания требуется подвести не менее 500 *квт* первичной мощности.

Радиолокационной станции, излучающей импульсы такой же мощности (150 *квт*), достаточно для своего питания всего лишь 10 *квт*. Все дело в том, что широковещательная станция излучает мощность непрерывно, а радиолокационная, излучающая кратковременные импульсы, в общей сложности работает очень мало, а большую часть времени «отдыхает», поэтому средняя мощность импульсной станции ($P_{ср}$) по величине значительно отличается от мощности в импульсе ($P_{имп}$).

Напомним, что мощностью источника энергии называется количество энергии, выработанное за 1 *сек*.

Интересно привести такие цифры: радиолокационная станция, работающая при условиях, указанных в нашем

примере, за круглосуточную безостановочную работу пошлет в пространство 43 200 000 импульсов, а общая продолжительность их составит всего лишь 7 *мин.* и 12 *сек.*

Подсчитаем, какая средняя мощность получается в этом случае.

В нашем примере за 1 *сек* передатчик будет работать: $10 \times 500 = 5\,000$ *мксек* или одну двухсотую секунды, а остальное время, т. е. $\frac{199}{200}$ сек., передатчик «отдыхает». Значит, и средняя мощность передатчика будет в 200 раз меньше импульсной мощности, т. е. $P_{cp} = \frac{20}{200} = \frac{1}{10}$ *квт*, или 100 *вт*, тогда в принятом масштабе ее надо изобразить линией толщиной 0,2 *мм*, что нами также не выполнено.

Приведенный несложный расчет показывает, что даже при небольших значениях средней мощности передающего устройства радиолокационной станции могут быть получены весьма большие значения мощности в кратковременном импульсе. В этом случае все соответствующие детали передатчика и лампы должны допускать значительные, хотя и кратковременные, нагрузки.

Откуда же появляется такая большая мощность, хотя бы и кратковременная? Ведь источник питания работает непрерывно и дает все время одну и ту же мощность, незначительную сравнительно с мощностью в импульсе. Дело в том, что на протяжении длительной паузы (в нашем примере 1 990 *мксек* за каждый период), соответствующие устройства накапливают энергию, вырабатываемую источником питания. Затем эта накопленная энергия устремляется в генератор передатчика и в течение короткого промежутка времени (в нашем примере 10 *мксек*) полностью расходуется на создание мощного импульса.

В качестве накопителей энергии в радиолокационных станциях применяются конденсаторы, индуктивности и другие устройства.

Из сказанного можно сделать заключение, что мощность в импульсе, средняя мощность, длительность импульса и частота посылки импульсов находятся в следующей зависимости: чем короче импульс, тем больше может быть мощность его при одной и той же средней мощности генератора, при этом, чем меньше частота повторения импульсов (или

чем больше период повторения импульсов), тем меньше значение средней мощности при одной и той же заданной мощности в импульсе.

ГЕНЕРАТОР ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Генератор высокой частоты радиолокационных станций вырабатывает (генерирует) в импульсном режиме ультракороткие волны нужной длины (в зависимости от назначения станции)

Обычно импульсные генераторы делают однокаскадными, стремясь к простоте устройства.

В качестве источника мощных колебаний в импульсных генераторах метрового и отчасти дециметрового диапазона применяются специальные импульсные лампы, работающие по принципу обычного триода с управляющей сеткой. Для более коротких волн такие генераторные лампы непригодны, так как в них время пролета электронов между электродами становится соизмеримым с периодом колебаний, в результате чего электронный поток не следует в точности за изменением сеточного переменного напряжения, и лампа перестает генерировать.

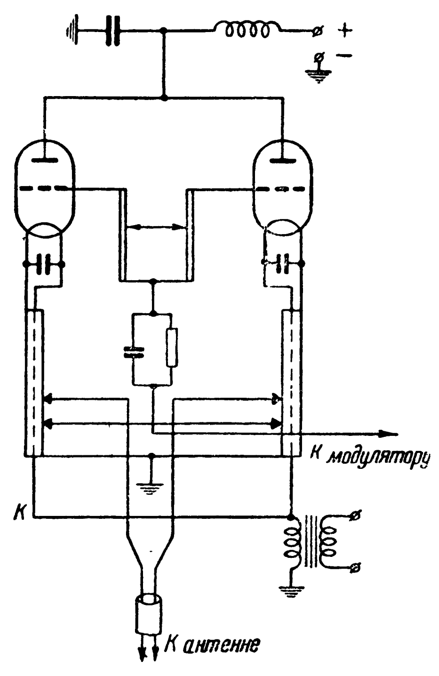
Кроме этой основной причины существует и ряд других. Все они вызывают неустойчивость в работе схемы генератора, поэтому генераторные триоды находят применение в радиолокационных передатчиках до определенного предела длины волны. Для большинства таких ламп рабочим пределом является волна 0,3 *м*.

В диапазоне сантиметровых волн применяются специальные вакуумные приборы — магнетроны, разработанные впервые в Советском Союзе, а также клистроны и лампы с бегущей волной. Идея, положенная в основу работы последних, принадлежит также советским ученым. Эти приборы в настоящее время являются единственными источниками генерации сантиметровых волн.

Особенностью схем ультракоротковолновых генераторов на лампах в диапазоне примерно от 1,5 *м* и короче является отсутствие обычных контурных конденсаторов и катушек индуктивностей. Для работы схемы емкость и индуктивность на ультракоротких волнах должны быть весьма малыми. Обычно для нормальной работы генератора достаточно бывает межэлектродной емкости лампы, а индуктивностью

служат небольшие отдельные витки или отрезки коаксиальных линий длиной в четверть волны.

Большинство схем генераторов метровых волн делают двухтактными с самовозбуждением. На фиг. 20 дана принципиальная схема одного из таких генераторов.



Фиг. 20. Схема генератора метровых волн.

Работает он следующим образом. Во время пауз схема не генерирует — лампы заперты отрицательным смещением на сетках. В момент прихода на сетки ламп пускового импульса от модулятора схема начинает генерировать. Время генерации схемы строго соответствует времени действия пускового импульса модулятора, которым управляет хронизатор. С прекращением действия пускового импульса лампы опять запираются до начала следующего пускового импульса и т. д. В моменты генерации схема вырабатывает мощные импульсы ультравысокочастотных колебаний, которые поступают в антенну и излучаются в пространство.

КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ КОНТУРЫ

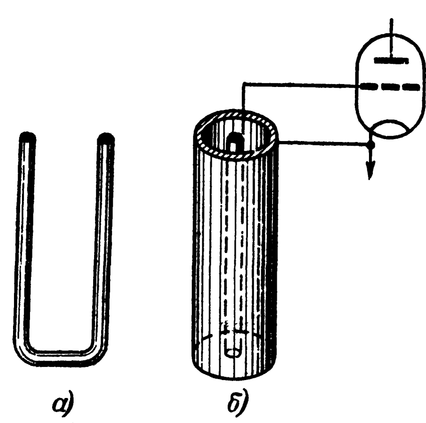
Обычные контуры с сосредоточенной емкостью и индуктивностью в виде конденсатора и катушки не могут быть применены для работы в приемниках и передатчиках на сантиметровом диапазоне волн.

Известно, что в обычных колебательных контурах энергия электромагнитного поля распределяется следующим образом: энергия электрического поля сосредоточена в конденсаторах, а магнитного — в катушке индуктивности. Такое

явление наблюдается только до определенного предела длины волны и нарушается при работе контуров на очень коротких волнах, и особенно в сантиметровом диапазоне. Элементы схемы и соединительные провода, входящие в колебательный контур, образуют ряд паразитных контуров со своей емкостью и индуктивностью. Величина этих емкостей и индуктивностей достаточно велика, в результате чего энергия электромагнитного поля распределяется по всем паразитным контурам и сильно излучается.

В ультракоротковолновой технике применяются колебательные контуры иного вида.

В дециметровом диапазоне применяются колебательные системы, состоящие из отрезков короткозамкнутых четвертьволновых линий открытых и коаксиальных (фиг. 21). В электрическом отношении коаксиальная линия эквивалентна контуру, состоящему из удлиненного витка с емкостью и индуктивностью, распределенными равномерно по всей длине контура, поэтому такие системы представляют собой резонансный контур. Собственная частота этого контура зависит от длины линии.



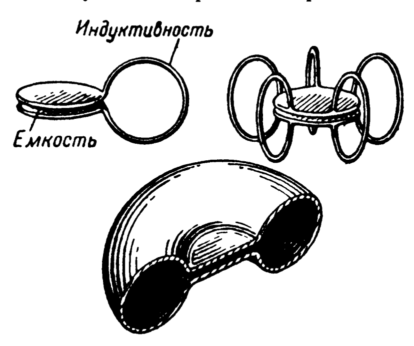
Фиг. 21. Колебательные контуры.
а—открытый; *б*—коаксиальный.

В коаксиальных контурах электромагнитная энергия сосредоточена внутри полости, экранированной наружной трубой. Кроме того, в них отсутствуют изоляторы, поэтому потери в таких контурах очень малы.

На сантиметровых волнах применяются контуры особого вида — полые или объемные резонаторы. Такой контур впервые разработал и дал его теорию советский ученый проф. М. С. Нейман. В последние годы теория объемных резонаторов дополнена работами советского ученого Г. В. Кисунько.

Резонатор можно рассматривать как колебательный контур, составленный из большого числа отдельных витков, вплотную примыкающих один к другому, и двух параллель-

ных пластин конденсатора (фиг. 22). Такое включение витков параллельно уменьшает общую индуктивность контура, поэтому полые резонаторы, имеющие форму шара, цилиндра тороида и др., служат колебательными контурами, внутри которых могут совершаться электромагнитные колебания очень высокой частоты. Частота этих колебаний определяется геометрическими размерами объемного резонатора.



Фиг. 22. Образование объемного резонатора (тороида) из отдельных контуров.

Если через резонатор будут проходить электроны, то в нем при определенных условиях могут возникнуть незатухающие электромагнитные колебания. Таким образом, энергия электронного потока передается резонатору и преобразуется в энергию электромагнитных колебаний.

ЛАМПЫ УКВ

В схемах радиолокационных приемников, работающих на дециметровых волнах, обычно применяются лампы типа «жолудь» (фиг. 23) и других специальных типов. Их особенностью являются: малые размеры, отсутствие цоколя и особое устройство выводов, благодаря чему уменьшается вредная емкость между электродами.

Приоритет в создании дециметровых триодов и основные идеи конструкций таких ламп принадлежат советским инженерам, которые в 1938—1939 гг. под руководством Н. Д. Девяткова создали ряд ламп, работающих в дециметровом диапазоне с предельной волной 15—20 *см*. Наши ученые Г. А. Гринберг и В. Е. Никольский первые разработали теорию таких триодов.

При дальнейшем укорочении волны до 10 *см* в приемниках и маломощных генераторах применяются так называемые «маячковые» и металлокерамические лампы. Обе лампы являются триодами.

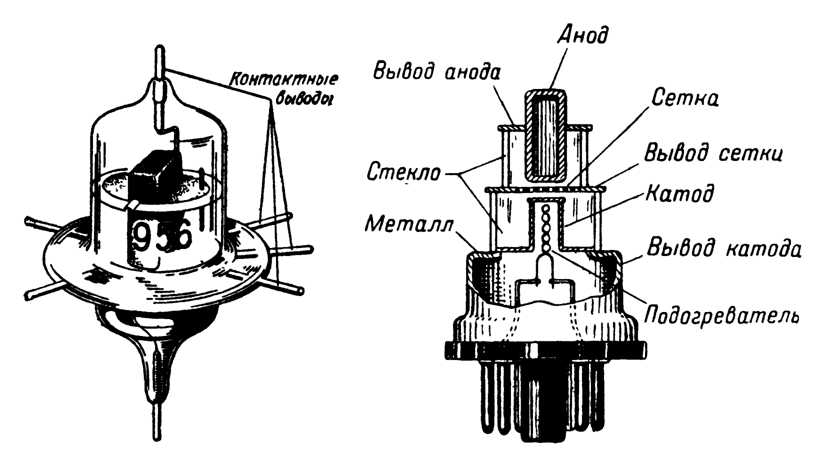
Характерными особенностями «маячковой» лампы (фиг. 24) являются плоские электроды и дисковые выводы от

анода и сетки. Очень малое расстояние между сеткой и катодом (около 0,1 *мм*) обеспечивает малое время пролета электронов в лампе, а небольшие размеры плоских электродов — малые межэлектродные емкости; все это дает возможность применять такие лампы на очень коротких волнах.

Некоторые типы современных «маячковых» ламп могут генерировать волны до 9 *см*, это наиболее короткая волна, полученная на триодах.

Дисковые выводы «маячковых» ламп хорошо приспособлены для включения в коаксиальную колебательную систему, которая применяется на сантиметровых волнах.

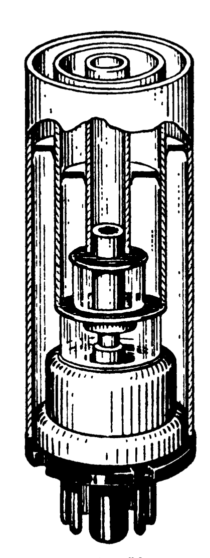
На фиг. 25 изображена «маячковая» лампа, включенная в коаксиальную колебательную систему. Колебательные контуры (резонаторы) анодный и сеточный образованы из труб, а верхней стенкой резонаторов служат подвижные поршни настройки (короткозамыкатели).



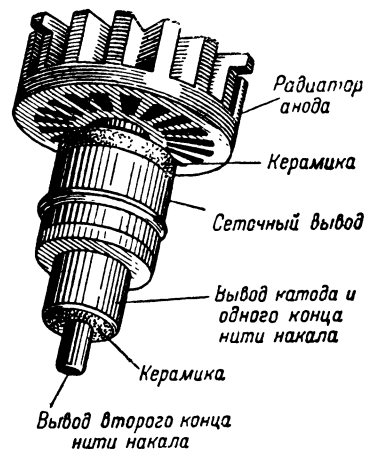
Фиг. 23. Лампа типа „жолудь". Фиг. 24. Маячковая лампа.

Металлокерамическая лампа (фиг. 26) имеет дисковые электроды и цилиндрические выводы. Вместо стекла баллон такой лампы изготовляется из керамического материала, что дает меньшие потери и допускает более высокую температуру нагрева. Для охлаждения лампы на анодный вывод навинчивается металлический радиатор.

Металлокерамическая лампа с цилиндрическими выводами также удобна для сочленения с коаксиальными колебательными контурами.



Фиг. 25. Коаксиальная колебательная система с маячковой лампой.



Фиг. 26. Металлокерамическая лампа.

В зависимости от способа охлаждения керамическая лампа может длительно генерировать мощности до нескольких сотен ватт.

МАГНЕТРОН

Магнетрон — принципиально новый электронно-вакуумный прибор, служащий для генерации мощных ультравысокочастотных колебаний.

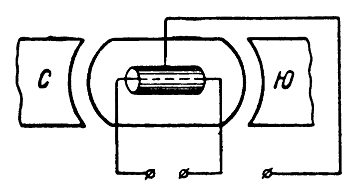
Идея современного магнетрона впервые в мире была выдвинута членом-корреспондентом Академии наук СССР М. А. Бонч-Бруевичем. Практически построили первый многорезонаторный магнетрон советские инженеры Н. Ф. Алексеев и Д. Е. Маляров в 1936—1937 гг.

Такой магнетрон в настоящее время является единственным прибором для генерации мощных колебаний на волнах короче 10 — 15 *см*. Конструкция магнетрона непрерывно совершенствуется, одновременно повышается мощность, которую можно получить в импульсе от такого прибора. Уже

имеются магнетроны, отдающие мощность до 3 000 *квт* в импульсе, при средней потребляемой мощности около 2,5—3 *квт*.

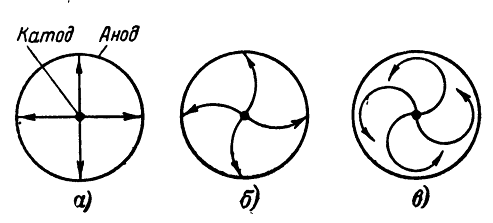
Чтобы понять принцип действия магнетронов, напомним о влиянии магнитного и электрического полей на полет электронов.

Рассмотрим полет электронов в простейшем двухэлектродном вакуумном приборе (фиг. 27). Из раскаленного катода вылетают электроны, которые под воздействием электрического поля анода прямолинейно движутся к нему. Если кроме электрического поля на электроны действует и магнитное поле, перпендикулярное направлению движения электронов, то траектория полета электронов искривляется. Чем сильнее магнитное поле, тем меньше будет радиус кривой полета электронов.



Фиг. 27. Простейший магнетрон.

На фиг. 28, *а* показаны траектории полета электронов под воздействием только электрического поля, на фиг. 28, *б* — под воздействием электрического и слабого магнитного поля и, наконец, на фиг. 28,*в* показан путь электронов под воздействием электрического поля и сильного (критического) магнитного поля. В этом случае электрическое поле заставляет электроны двигаться к аноду, а сильное магнитное поле отклоняет их от этого пути, стремясь вернуть электроны к катоду. При соответствующих значениях электрического и магнитного полей некоторые электроны, вылетающие из катода, уже не возвращаются на него, но они также не могут попасть и на анод, пролетая лишь близко к его внутренней поверхности. Траектория такого движения электронов похожа на петлю. Большое количество электронов при своем петлеобразном дви-

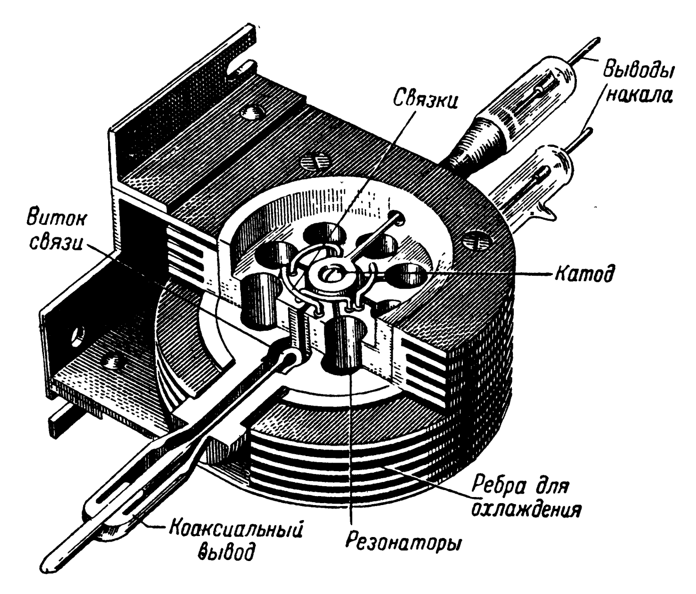


Фиг. 28. Пути движения электронов в магнетроне.

а — при отсутствии магнитного поля; *б* — при слабом магнитном поле; *в* — при большом значении магнитного поля.

жении создает непрерывное электронное кольцо, вращающееся вокруг катода и проходящее вблизи анода.

Фиг. 29 дает представление об устройстве многокамерного магнетрона без магнита. Анод его имеет форму цилиндра, выполненного из красной меди: в стенках анода высверлены отверстия, сообщающиеся при помощи щелей с внутренним пространством лампы. Такое сочетание щели с отверстием представляет собой резонатор, т. е. своеобразный колебательный контур, индуктивностью которого служит петля,



Фиг. 29. Разрез многокамерного магнетрона.

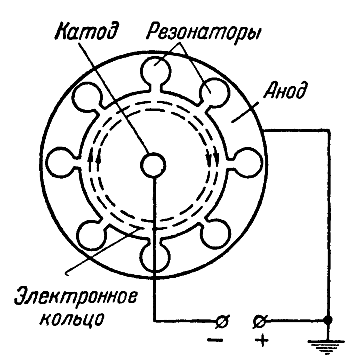
образованная отверстием, а емкостью — щель. Анод состоит из нескольких таких колебательных контуров. Обычно их делают 6 или 8.

Вращающийся под действием электрического и магнитного полей плотный электронный поток, пролетающий вблизи резонаторов, отдает им свою энергию, возбуждая и поддерживая в резонаторах незатухающие колебания ультравысокой частоты (фиг. 30).

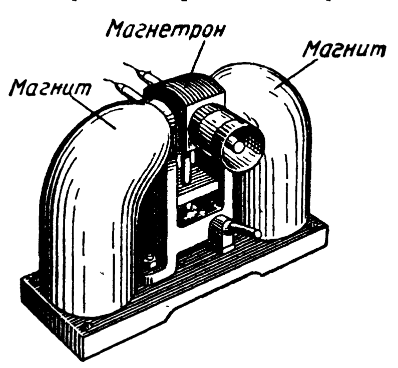
Таким образом, энергия движения электронов переходит в энергию электромагнитного поля колебательных контуров магнетрона.

Для вывода электромагнитной энергии из магнетрона достаточно поместить в один из колебательных контуров (так как они все связаны между собой) специальный отвод. В магнетронах таким отводом служит небольшая петля (виток), помещенная в один из резонаторов (фиг. 29); в этом витке наводится электродвижущая сила ультравысокой частоты. Далее энергия, выработанная магнетроном, поступает по коаксиальному фидеру или волноводу в антенну и излучается в пространство.

В магнетронах более коротких волн отвод энергии производится при помощи вибратора, конец которого припаивается к внутренней стенке одного из резонаторов магнетрона;



Фиг. 30. Вращающийся электронный поток в магнетроне.



Фиг. 31. Магнетрон с магнитом в рабочем положении.

другой конец, служащий излучателем, помещается в специальный объемный резонатор, откуда энергия по волноводу подводится к антенной системе.

В современных магнетронах магнитное поле создается при помощи постоянных магнитов, изготовляемых из специальных сплавов с хорошими магнитными свойствами. Эти магниты при малых размерах позволяют получать сильные магнитные поля.

На фиг. 31 показан магнетрон, установленный для работы в магните.

Из сказанного следует, что магнетрон является вакуумным прибором, генерирующим колебания сверхвысокой частоты, одновременно совмещая в себе контур передатчика, который мы привыкли видеть всегда отдельно от лампы. В радиотехнике длинных волн контур передатчика состоит

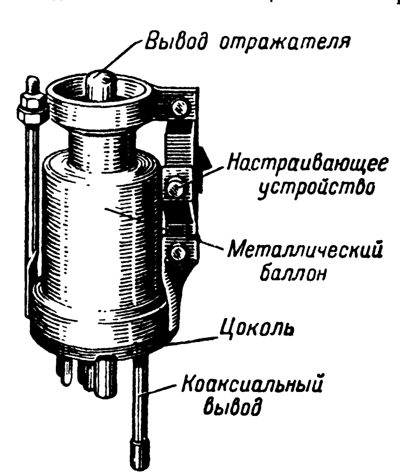
из катушки индуктивности и конденсатора. С укорочением волны детали контура уменьшаются, и, наконец, они переходят внутрь самой лампы — в магнетрон, составляя с ним неразрывное целое.

Недостатком магнетронов описанной конструкции является невозможность изменения частоты генерирования, так как она определяется геометрическими размерами резонаторов.

Существуют специальные конструкции магнетронов, у которых частоту колебаний можно регулировать в небольших пределах.

КЛИСТРОН

Клистрон — электровакуумный прибор, применяемый в качестве маломощного генератора (гетеродина) в приемниках сантиметровых волн.



Фиг. 32. Отражательный клистрон.

Принцип работы клистрона заключается в скоростной модуляции электронов, когда быстрые электроны догоняют медленные. Впервые эта идея была предложена в 1932 г. проф. Д. А. Рожанским задолго до появления клистронов за границей.

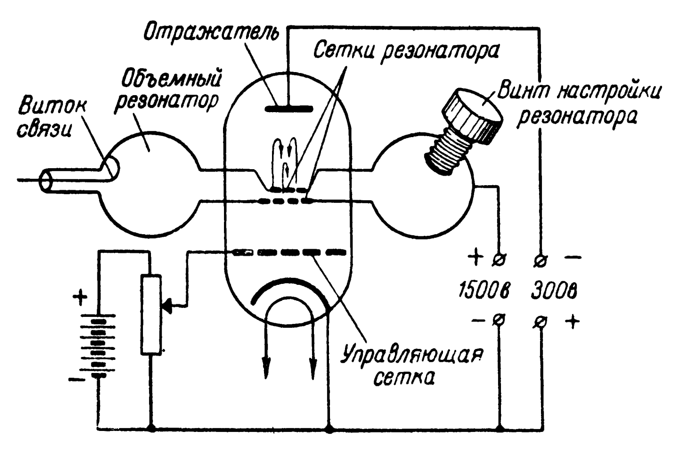
В работе клистрона использовано описанное явление возникновения электромагнитных волн в объемных резонаторах.

Первые клистроны в Советском Союзе были изготовлены в 1938—1941 гг. инженерами В. Ф. Коваленко и В. И. Калининым. Основы теории отражательного клистрона были разработаны советскими инженерами Я. П. Тарлецким и С. Д. Гвоздовером.

Существуют различные конструкции клистронов, вырабатывающих колебания мощностью до сотен ватт. В настоящее время наибольшее распространение получили так называемые отражательные клистроны, применяемые в приемниках. Общий вид такого клистрона приведен на фиг. 32.

Неотъемлемой частью клистрона является объемный резонатор (контур). На фиг. 33 дано схематическое изображение конструкции отражательного клистрона и схема его включения.

Принцип работы клистрона заключается в следующем. При включении накала из катода начинают вылетать электроны, которые под действием управляющей сетки,



Фиг. 33. Схема включения отражательного клистрона.

имеющей положительный потенциал, движутся к ней и пролетают через отверстия этого электрода. Двигаясь далее по инерции, электроны, пролетая сетки, являющиеся стенками объемного резонатора (контура), возбуждают его. Сетки при этом приобретают противоположные по знаку заряды и становятся как бы обкладками конденсатора объемного контура. В результате между сетками образуется переменное электрическое поле и напряжение на сетках будет менять свой знак с частотой, соответствующей резонансной частоте объемного контура.

Если движущийся с определенной скоростью поток электронов попадает в переменное электрическое поле конденсатора объемного контура, то действие этого электрического поля в различные полупериоды собственных колебаний контура на электроны будет различно. Скорость и энергия электронов, пролетающих электрическое поле в положительные полупериоды колебаний, будут увеличиваться. При пролете в отрицательные полупериоды, когда электроны попа-

дают в тормозящее поле, скорость и энергия их будут уменьшаться, при этом энергия электронов будет отдаваться тормозящему электрическому полю, т. е. в контур.

В результате действия переменного электрического поля на пролетающие электроны их поток станет неравномерным, так как группы электронов будут обладать различными скоростями.

Таким образом, одна группа электронов с большой скоростью будет обгонять другую и в некоторых местах будут групироваться электронные сгустки. Эти группы электронов при своем дальнейшем движении встречают сильное отталкивающее поле отражательного электрода, имеющего отрицательный потенциал. Под воздействием этого поля электроны изменяют направление своего движения на обратное и снова движутся к сеткам, при этом процесс группирования продолжается. Сгустки электронов вновь проходят через сетки объемного контура и опять отдают ему свою энергию.

Отрицательное напряжение на отражательном электроде подбирается так, чтобы сгустки электронов проходили через сетки (пластины конденсатора объемного контура) в момент отрицательного полупериода собственных колебаний, т. е. в момент тормозящего электрического поля. В результате этого мощность колебаний в объемном контуре заметно увеличивается и в нем создается сильное электромагнитное поле. Таким образом внутри объемного резонатора образуется энергия высокой частоты. Описанный процесс напоминает морской прибой, когда волны, обрушиваясь на берег, отдают свою энергию. Эта аналогия и послужила поводом для названия лампы — клистрон, что в переводе с греческого языка означает морской прибой.

Выход энергии высокой частоты из резонатора осуществляется при помощи петли, введенной через небольшое отверстие в стенке резонатора.

Объемный резонатор можно в небольших пределах настраивать, т. е. изменять частоту колебаний, возникающих внутри его.

Настройка осуществляется двумя способами — механическим и электрическим.

В первом случае при помощи специального винта или другим способом изменяется в небольших пределах внутренний объем резонатора, вследствие чего изменяется резонансная частота колебаний.

Электрический способ настройки клистрона заключается в изменении в небольших пределах отрицательного напряжения на отражательном электроде, вследствие чего изменяется фаза, с которой электроны пролетают через сетки объемного резонатора.

Этот способ используют для автоматической подстройки приемника на частоту передатчика радиолокационной станции путем изменения частоты гетеродина.

Отражательные клистроны могут генерировать мощность порядка нескольких сот милливатт, что вполне достаточно для гетеродина приемника.

ПРИЕМНИК

Напомним, что чувствительностью всякого приемника называется та минимальная амплитуда напряжения сигнала, которую надо подать на вход приемника, чтобы после соответствующего усиления получить на выходе достаточный для нормальной работы сигнал. Обычно чувствительность определяется микровольтами.

Если при излучении мощного импульса напряжение в антенне радиолокационной станции достигает нескольких тысяч вольт, то при приеме импульсов, отраженных от дальних целей, э. д. с., наведенная в антенне, измеряется всего лишь несколькими миллионными долями вольта (микровольтами).

Чувствительность радиолокационных приемников очень велика и в зависимости от назначения станции лежит в пределах от долей микровольта до 15—25 *мкв*. Для сравнения можно указать, что чувствительность большинства широковещательных приемников на коротковолновом диапазоне равна 100—200 *мкв*, т. е. в сотни раз хуже чувствительности радиолокационных приемников.

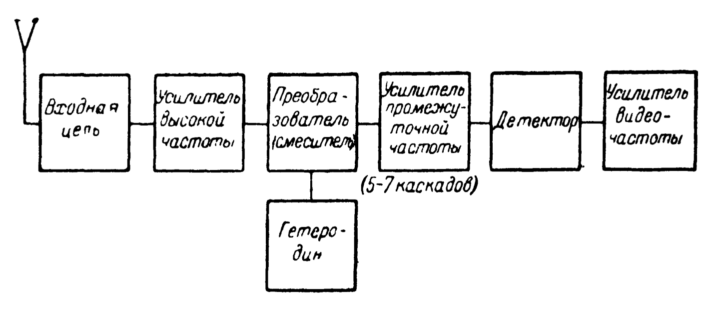
Чтобы сигнал, принятый приемником, мог нормально воздействовать на индикатор, к последнему надо подвести напряжение в пределах 10—200 *в*. Таким образом, общий коэффициент усиления радиолокационного приемника должен быть порядка нескольких миллионов.

Такое усиление при надежной и стабильной работе может быть получено в супергетеродинной схеме, сходной с применяемой в современных широковещательных приемниках.

Радиолокационные приемники имеют свои особенности, связанные с диапазоном волн, на которых они работают,

с характером сигналов, применяемых в радиолокации, и с другими специфическими требованиями, предъявляемыми к контурам, параметрам ламп и конструктивному выполнению. На фиг. 34 изображена одна из типовых скелетных схем супергетеродинного радиолокационного приемника, работающего на волнах длиннее 50 *см.*

Входная цепь, состоящая из настроенного контура, служит для связи антенны с приемником и частично отфильтровывает посторонние сигналы и шумы. Затем следуют каскады высокой частоты (1—2 каскада); преобразователь частоты, который принятую высокую частоту сигналов пре-



Фиг. 34. Скелетная схема радиолокационного приемника.

образует в частоту более низкую—промежуточную. На промежуточной частоте происходит основное усиление принятого сигнала в пяти-семи каскадах. Иногда, если требуется весьма большое усиление, применяют двойное понижение частоты принятого сигнала и приемник содержит два преобразователя и две группы каскадов усиления на двух различных промежуточных частотах.

В обычных вещательных супергетеродинных приемниках для преобразования высокой частоты в промежуточную в качестве смесительных ламп применяются многоэлектродные лампы. В приемниках, работающих на дециметровом и сантиметровом диапазонах, такие лампы не годятся, так как они имеют очень большой уровень шумов и очень малое входное сопротивление. Применяются же более простые лампы — триоды и диоды, имеющие малую входную емкость (большое входное сопротивление) и малый уровень шумов.

На сантиметровых волнах диод также непригоден, так как в нем сказывается время пролета электронов между

электродами, которое становится соизмеримым с периодом высокочастотных колебаний, вследствие чего электроны не попадают в нужный момент на анод.

На сантиметровых волнах в качестве смесителя применяется обычный кристаллический детектор. В детекторе используются специально обработанные кристаллы кремния, а контактом служит острие пружинки из вольфрама. Все это устройство помещают в специальный патрон и заливают изоляционной массой для защиты от механических повреждений и сырости.

Для работы в качестве смесителя кристаллический детектор помещают в особую камеру или объемный резонатор, куда подводятся колебания высокой частоты, принятые антенной и от гетеродина.

После усиления сигнал промежуточной частоты выпрямляется в детекторе, т. е. преобразуется в более низкие — видеочастотные колебания, затем усиливается двумя-тремя каскадами видеочастоты (низкой частоты), после чего поступает в индикатор.

В некоторых типах приемников радиолокационных станций усиление по высокой и низкой частоте может отсутствовать.

Современные радиолампы позволяют осуществить усиление принятого сигнала и довести его по мощности или напряжению до сколько угодно большой, практически требующейся величины. Однако существует предел усиления, определяемый минимальным соотношением уровня сигнала к уровню помех и шумов.

Помехи внешние принимаются антенной и попадают в приемник вместе с сигналами. Помехи внутренние создаются за счет теплового движения электронов в антенне, в контурах приемника и лампах; кроме того, они могут возникать в контурах приемника вследствие наведения в них индуцированных токов электростатическими и магнитными полями. Такие шумы образуются, когда контуры приемника плохо экранированы.

В радиолокационных приемниках, работающих на волнах короче 5 *м*, помехи внешнего происхождения значительно слабее собственных шумов приемника. В этих условиях уровень внутренних шумов является наиболее важным фактором чувствительности радиолокационного приемника.

Чем ниже уровень шумов, тем более слабый отраженный сигнал может быть отличим на фоне шумов, следова-

тельно, тем больше будет дальность действия радиолокационной станции.

Особенностью радиолокационных приемников является отсутствие переменной настройки по диапазону и хорошая помехоустойчивость. Обычно приемник радиолокационной станции принимает отраженные сигналы только своего передатчика, поэтому он строится для приема только одной волны и может иметь лишь небольшую подстройку на случай некоторой нестабильности работы передатчика.

Хорошая помехоустойчивость радиолокационных приемников обусловливается почти полным отсутствием атмосферных помех на волнах короче 5 *м* и синхронной работой передатчика и приемника. Кроме того, благодаря острой направленности действия антенн радиолокационных станций и ограниченной дальности действия наземных станций ультракоротковолнового диапазона вероятность помех от соседних станций также снижается.

Важным параметром радиолокационного приемника, как и всякого другого, является его частотная характеристика или полоса пропускания частот. В обычных вещательных приемниках для хорошего воспроизведения звучания голоса и музыки достаточна полоса частот 8 000—12 000 *гц*. Для воспроизведения без искажений коротких импульсов, применяемых в радиолокационной технике, которые состоят из очень большого числа гармоник, необходима широкая полоса частот, измеряемая сотнями тысяч и миллионами герц.

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТРУБКА

Прежде чем знакомиться с индикаторами радиолокационных станций, мы расскажем об электронно-лучевой трубке, ее устройстве и работе.

Еще в 1907 г. русский ученый проф. Б. Л. Розинг получил патент на электронно-лучевую трубку с магнитной разверткой, которую он предложил использовать для «электрической телескопии» (телевидения).

В этот же период другой русский ученый Л. И. Мандельштам впервые в мире разработал схему и метод временнóй развертки электронного луча для изучения быстрых электрических колебаний. В дальнейшем его метод усовершенствовал проф. Д. А. Рожанский. Метод советского ученого лег в основу работы всех современных индикаторов радиолокационных станций.

Электронно-лучевая трубка является главной составной частью индикатора радиолокационной станции любого типа и назначения.

В радиолокационной технике применяются в основном два типа трубок — с электростатическим и магнитным управлением электронным потоком.

Электронно-лучевая трубка представляет собой вакуумный прибор, при помощи которого возможно изучение быстрых электрических колебаний.

Известно, что человеческий глаз, получая какое-либо зрительное впечатление, удерживает его примерно $^1/_{16}$ сек. На этом свойстве человеческого глаза основано кино.

Если несколько последовательных неподвижных изображений (кадров) менять чаще, чем 16 раз в секунду, то человеческий глаз не будет успевать следить за каждым изображением отдельно и создастся иллюзия движения. И, наоборот, если одна и та же картина будет повторяться чаще, чем 16 раз в секунду, то получится впечатление неподвижной картины.

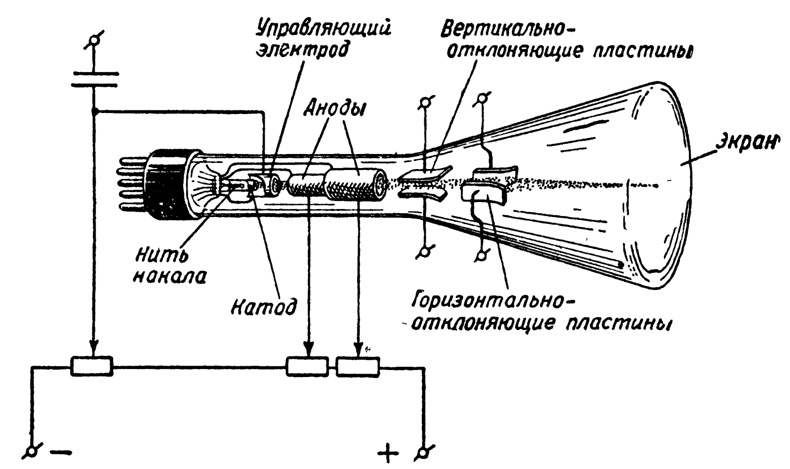
В электронно-лучевой трубке поток электронов ударяет в одни и те же точки экрана значительно больше 16 раз в секунду, поэтому глаз получает впечатление линий и пятен с очень небольшим мерцанием. Если светящееся пятно заставить перемещаться с большой скоростью по экрану трубки по какой-то линии (замкнутой или прерывающейся), причем частота повторения этого движения будет больше 16 раз в секунду, то человеческий глаз увидит след быстро перемещающегося пятна в виде неподвижной светящейся линии, определенной фигуры или картины. Именно такие быстрые движения и совершает электронный луч трубки телевизионного приемника.

В электронно-лучевой трубке поток электронов, излучаемых катодом, «бомбардирует» экран трубки, покрытый специальным составом, обладающим способностью флуоресцировать, т. е. светиться в местах «бомбардировки» его электронами.

Если поток электронов заставить быстро перемещаться, например, в такт с электрическими колебаниями и одновременно быстро передвигаться от одного края экрана до другого, непрерывно повторяя эти движения, то на экране трубки мы можем наблюдать неподвижную картину синусоидальных электрических колебаний.

Таким образом, при помощи электронно-лучевой трубки можно видеть, измерять и изучать быстрые электрические колебания.

На фиг. 35 изображена схема устройства и включения простейшей электронно-лучевой трубки с электростатическим управлением электронного потока.



Фиг. 35. Устройство и схема включения электронно-лучевой трубки с электростатическим управлением.

В стеклянной колбе электронно-лучевой трубки заключены нить накала, подогревный катод, управляющий электрод, первый и второй ускоряющие аноды, две пары отклоняющих пластин: горизонтальные и вертикальные. Стекло трубки в расширенной ее части покрыто внутри специальным составом, светящимся в том месте, куда ударяются электроны. Эта часть трубки называется экраном.

Работает электронно-лучевая трубка следующим образом. Раскаленный катод излучает поток электронов. Управляющий электрод, на который подается небольшой отрицательный относительно катода потенциал, регулирует поток электронов, покидающих пространственный заряд, образуемый около катода. Действие управляющего электрода сходно с работой сетки обычной радиолампы. Изменением потенциала управляющего электрода регулируется яркость пятна на экране. Увеличив отрицательное напряжение, можно полностью «запереть» поток электронов так, что он не будет попадать на экран.

Поток электронов, проходя далее через первый и второй аноды, на которые подается выпрямленное высокое напряжение (1 000—6 000 *в*), фокусируется в острый сходящийся пучок и ускоряется.

Между каждой парой электродов образуются электрические поля с возрастающими потенциалами; они действуют на электронный поток как собирательные электронные линзы. Подобно световому лучу в оптике поток электронов, проходя через электронные линзы, преломляется и фокусируется в острый пучок, который, сходясь на экране электронно-лучевой трубки, дает светящееся пятно очень малого размера.

Яркость и продолжительность свечения экрана зависят от интенсивности электронного пучка и от свойства вещества, покрывающего экран. В современных электронно-лучевых трубках, применяемых в определенных типах радиолокационных станций, продолжительность свечения экрана после действия на него электронного пучка (так называемое послесвечение) может достигать даже нескольких минут.

Экран трубки обычно имеет форму шарового сегмента. Для увеличения точности отсчетов размеры экранов стараются сделать большими, однако это связано с увеличением напряжения на отклоняющих пластинах.

Две пары отклоняющих пластин образуют два плоских конденсатора с перпендикулярными электрическими полями. Разберем, как действуют отклоняющие пластины на поток электронов.

Рассмотрим сначала действие только одной вертикально отклоняющей пары пластин. Если на пластинах нет никакого заряда, то электронный луч проходит между ними, не меняя своего направления. Теперь зарядим верхнюю пластину положительно, а нижнюю отрицательно, для чего присоединим их к источнику постоянного тока. Электронный луч немедленно изменит свое направление — приблизится к положительно заряженной пластине.

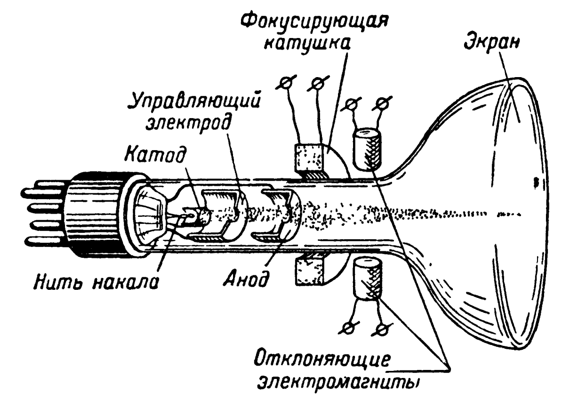
Если увеличить напряжение на пластинах, то луч отклонится еще больше. При перемене полярности на пластинах электронный луч отклонится в другую сторону, что можно заметить по перемещению пятна на экране трубки.

Подключив к пластинам источник переменного тока, мы увидим, что пятно на экране будет совершать движение вверх и вниз и при достаточно большой частоте переменного тока на экране будет видна сплошная светящаяся вертикальная полоса.

Такое же влияние на электронный луч будет оказывать другая пара пластин, если на нее подавать различные напряжения, при этом смещение луча будет происходить в горизонтальном направлении.

При одновременной подаче напряжения на обе пары пластин на экране трубки можно получить самые разнообразные фигуры, контур которых будет зависеть от величины, частоты и фазы напряжений на каждой паре пластин.

Например, если на обе пары пластин подать синусоидальные напряжения одинаковой амплитуды и частоты, но



Фиг. 36. Электронно-лучевая трубка с электромагнитным управлением.

с фазами, сдвинутыми на 90°, то на экране трубки мы увидим след от пятна в виде окружности.

Существуют электронно-лучевые трубки с магнитным управлением электронного луча. Конструкция их несколько проще трубок, описанных выше, — они не имеют пластин, служащих для отклонения электронного луча. Способ получения электронного луча и управление количеством электронов такие же, как и в трубке с электростатическим управлением. Фокусировка и отклонение электронного луча производятся при помощи магнитного поля, создаваемого электромагнитами, которые располагаются вокруг горловины трубки (фиг. 36).

Для управления отклонением луча в двух перпендикулярных направлениях применяют две пары катушек. Катушки попарно соединены последовательно. При прохождении через них тока в том или ином направлении магнитное поле,

создаваемое электромагнитами, заставляет поток электронов перемещаться в направлении, перпендикулярном магнитному полю.

Отклонение луча электронов в этом случае пропорционально силе магнитного поля, следовательно, оно пропорционально числу ампервитков отклоняющих катушек.

Электронно-лучевые трубки с магнитным управлением получили широкое распространение в индикаторах радиолокационных станций. Преимущества их перед трубками с электростатическим управлением следующее: четкость изображения пятна, меньшая длина трубки, простота конструкции и большая прочность.

В современных индикаторах радиолокационных станций очень часто применяется способ так называемой яркостной отметки. Этот способ заключается в том, что сигнал с выхода приемника попадает на управляющий электрод трубки; в зависимости от величины сигнала меняется поток электронов через управляющий электрод, а следовательно, и яркость пятна на экране трубки.

Благодаря исключительно малой массе электронов[1] электронно-лучевую трубку можно считать безинерционным прибором. Это обстоятельство позволяет управлять лучом электронов (яркостью и перемещением) при очень быстрых колебательных процессах, а также наблюдать и измерять кратковременные электрические явления продолжительностью до долей микросекунды.

ИНДИКАТОРЫ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ

Мы уже говорили, что радиолокационные станции имеют индикаторы различного назначения, в том числе индикатор, при помощи которого обнаруживается цель и определяется дальность до нее.

С основным принципом определения дальности мы уже познакомили наших читателей — это измерение времени, прошедшего с момента излучения радиолокационной станцией мощного импульса и до момента возвращения отраженного радиоэхо обратно. Читателю уже известно, насколько малы такие промежутки времени. Но как бы ни было

---

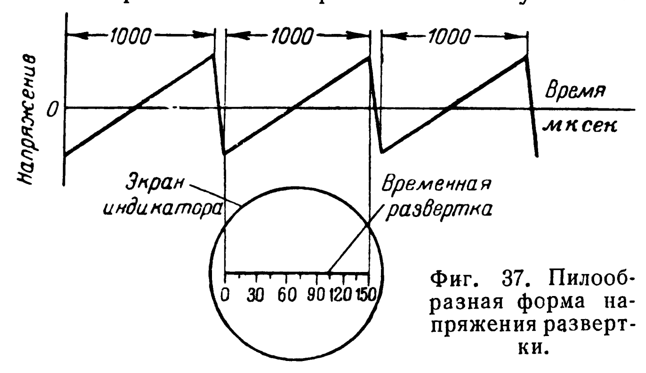
[1] Масса электрона составляет $0{,}9 \cdot 10^{-27}$ *г*, т. е. меньше массы атома водорода, являющегося самым легким атомом, в 1 845 раз. При значительном увеличении скорости электрона, когда она приближается к скорости света, масса электрона увеличивается.

мало это время, радиолокационный индикатор измерит его. Значит, индикатор дальности можно назвать «часами», измеряющими с большой точностью очень короткие промежутки времени.

В качестве «циферблата» таких «часов» служит экран электронно-лучевой трубки, а «стрелкой» —электронный луч, который, пробегая по экрану, оставляет видимый след.

Рассмотрим, как работает индикатор дальности радиолокационных станций.

Индикатор — это сложное радиотехническое устройство, состоящее из специальных схем, задачей которых является вырабатывать различные напряжения — импульсы определенной величины, формы и длительности. Импульсы напряжений подаются на соответствующие электроды электронно-лучевой трубки согласованно с работой передатчика. Этим согласованием и управлением ведает на радиолокационной станции хронизатор.



Фиг. 37. Пилообразная форма напряжения развертки.

Специальная схема индикатора вырабатывает переменное напряжение, имеющее форму зубцов пилы (фиг. 37). Такое напряжение равномерно и с постоянной скоростью нарастает до определенной величины, затем быстро падает и процесс нарастания повторяется вновь. Время нарастания напряжения можно регулировать, а для каждого данного типа радиолокационной станции оно связано с максимальной дальностью действия.

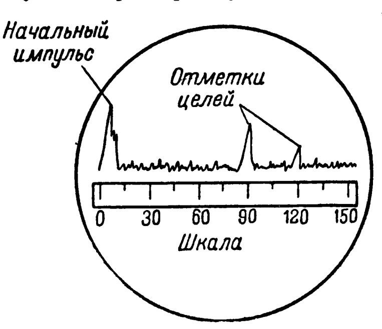
Такая схема называется схемой «ждущей развертки», так как она начинает работать только после того, как поступит пусковой импульс от хронизатора.

Если напряжение, полученное от схемы «ждущей развертки», подать на горизонтально отклоняющие пластины

электронно-лучевой трубки, то оно заставит электронный луч отклониться из одного крайнего положения в другое и на экране трубки мы увидим след пятна. Отклонение луча повторяется с частотой излучения импульсов, т. е. не менее 50 раз в секунду, поэтому на экране трубки будет видна горизонтальная светящаяся черта.

Такая черта на трубке называется временнóй разверткой, так как время, в течение которого электронный луч пробегает путь от начала до конца развертки, строго определено и известно. Оно задается тактическими параметрами станции. При проектировании станции элементы схемы «ждущей развертки» рассчитываются так, чтобы напряжение вырабатывалось в определенное, заданное время.

Допустим, что время, в течение которого пятно электронного луча совершает свой путь от начала до конца развертки на трубке равно 1 000 *мксек*. За такой промежуток времени электромагнитная энергия успеет распространиться на 300 *км*, иначе говоря, она успеет пройти 150 *км* до цели и, отразившись, вернуться обратно.



Фиг. 38. Экран электронно-лучевой трубки со шкалой.

Значит, в нашем примере длина временнóй развертки будет соответствовать расстоянию 150 *км*, а так как электронный луч совершает этот путь на экране трубки с одинаковой скоростью, то, разделив всю длину временнóй развертки на равные промежутки, получим шкалу, соответствующую расстоянию 150 *км*. В индикаторах радиолокационных станций так и поступают. Шкала дальности наносится на линейку и помещается около экрана трубки (фиг. 38).

Таким образом, «циферблат» наших «электронных часов» показывает уже не время, а расстояние в километрах; теперь необходимо на этом «циферблате» иметь указатель «стрелку часов», которая могла бы сигнализировать наблюдателю о том, что радиолокационная станция обнаружила цель, и, кроме того, указать, на каком расстоянии от радиолокационной станции эта цель находится в данное время.

Оказывается, что таким указателем и одновременно

«стрелкой часов» является все тот же электронный луч, который «чертит» временную развертку на трубке. Вот как это получается.

Хронизатор дает пусковой импульс, и передатчик радиолокационной станции при помощи направленной антенны излучает в определенном направлении мощный импульс электромагнитной энергии. Если на пути распространения импульса нет никаких препятствий, то он уходит в пространство.

Одновременно с пусковым импульсом на передатчик хронизатор дает «команду» на схему «ждущей развертки», которая подает напряжение на горизонтально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки. Это напряжение, действуя на электронный луч, заставляет его чертить светящуюся линию на экране трубки.

Если на пути распространения импульса электромагнитной энергии окажется какое-либо отражающее тело, например самолет, то часть отраженной энергии вернется к станции, будет принята антенной, затем после усиления приемником попадет на вертикально отклоняющие пластины трубки индикатора. Импульс отраженной энергии заставит электронный луч при его горизонтальном движении отклониться вверх или вниз. След от кратковременного отклонения будет виден на экране трубки в виде небольшого выброса, расположенного в том месте шкалы трубки, которое соответствует времени, прошедшему с начала излучения мощного импульса до момента возвращения отраженного импульса. Для простоты рассуждений здесь говорилось об одном импульсе, на самом деле описанный процесс происходит много раз в секунду (в различных станциях он может повторяться от 50 до 5 000 раз в секунду), поэтому на экране трубки будет видна неподвижная картинка, подобная изображенной на фиг. 38.

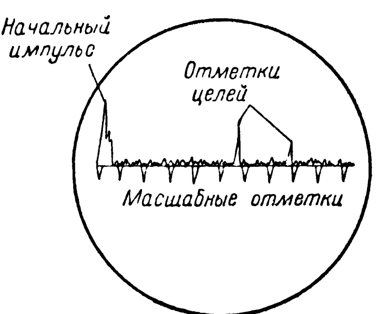
На экране видно изображение начального импульса, часто его называют зондирующим импульсом. Такое изображение получается потому, что часть энергии мощного импульса в момент его излучения попадает в приемник и изображается на экране индикатора в начальный момент развертки. Далее, на экране видны изображения двух отраженных от цели импульсов, в данном примере обнаруженные цели находятся на расстоянии 90 и 120 *км* от радиолокационной станции.

На экране индикатора видны изображения небольших

зубчиков,—это атмосферные шума и различного рода помехи. Иногда на экране трубки наблюдаются изображения импульсов, отраженных от местных объектов, — горы, дома, фабричной трубы и т. п. Чтобы избежать этих помех, радиолокационную станцию стараются устанавливать на ровном открытом месте.

Если на пути распространения импульсов будет не одна, а несколько целей, находящихся в одном направлении, но на различном расстоянии от радиолокационной станции, то при определенных условиях, зависящих от разрешающей способности данной станции (о чем будет сказано ниже), на индикаторе будут получаться различные отметки от этих целей, по которым можно определить дальность до каждой из них.

Таким образом, на индикаторе радиолокационной станции можно не только «видеть» цели, но и определять, на каком расстоянии эти цели находятся.



Фиг. 39. Экран электронно-лучевой трубки с электрической шкалой.

При помощи описанного индикатора дальность до цели определяется с точностью до 10% расстояния. У большинства современных радиолокационных станций вместо механической шкалы, налагаемой на экран трубки, шкала создается электрическим способом, тем же электронным лучом. Для этой цели в индикаторе существует специальная схема, вырабатывающая кратковременные импульсы через строго определенные интервалы. Эта схема начинает работать одновременно со схемой «ждущей развертки», но свои импульсы она подает на вертикально отклоняющие пластины, и электронный луч «вычерчивает» на экране светящуюся шкалу дальности (фиг. 39).

Для определения направления или азимута радиолокационная станция имеет другой механический индикатор, связанный с вращающейся антенной, он показывает направление, в котором в данный момент излучает и принимает антенна станции

Кроме механических индикаторов азимута на некоторых

типах радиолокационных станций применяются электронные индикаторы, где на экране электронно-лучевой трубки различными способами отмечается азимут.

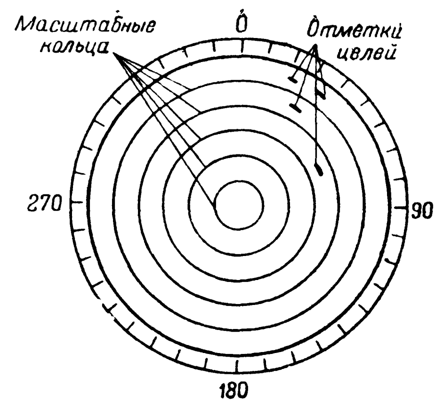
Существуют индикаторы кругового обзора, при помощи которых можно получить одновременно сведения о дальности и азимуте всех целей, находящихся во всех направлениях в радиусе действия радиолокационной станции.

Индикаторы кругового обзора очень удобны для использования их на море и на станциях обнаружения самолетов. Индикатор кругового обзора на корабельной радиолокационной станции дает одновременно общую обстановку морских целей, а на станциях обнаружения воздушных целей — всех находящихся в радиусе действия станции самолетов. В индикаторе кругового обзора применяется электронно-лучевая трубка с магнитным управлением и с экраном, обладающим способностью послесвечения. Электромагнит, управляющий отклонением электронного луча, связан с системой вращающейся антенны, и сам вращается вокруг горловины электронно-лучевой трубки синхронно с вращением антенны. Временная развертка начинает свое движение из центра экрана трубки к периферии, ее направление все время совпадает с направлением излучения (приема) антенны. Таким образом, экран трубки как бы покрывается светящимся растром, созданным линиями временной развертки, расположенными вплотную одна к другой. Такая развертка называется радиально-круговой.

На управляющий электрод электронно-лучевой трубки подают такое отрицательное напряжение, чтобы растр не был виден на экране. Схема, вырабатывающая напряжение для создания шкалы дальности, подает положительные импульсы на управляющий электрод трубки. В моменты подачи этих импульсов трубка «отпирается», и электронный луч при своем движении дает на экране яркие светящиеся точки, расположенные через определенные интервалы на каждом радиусе временной развертки. Так как трубка обладает послесвечением, то точки всех радиусов сливаются, и на экране будут видны светящиеся окружности — масштабные кольца.

Импульсы, отраженные от находящихся в воздухе самолетов, после усиления попадают на управляющий электрод трубки и «отпирают» электронный луч, который в соответствующем месте экрана при своем движении дает светящую-

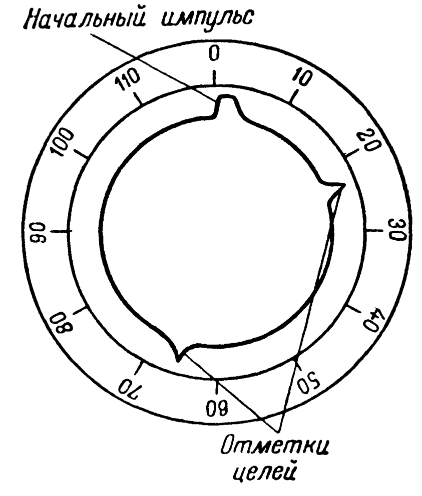
ся точку. А так как при сравнительно медленном круговом движении антенны радиолокационная станция успеет излучить и принять не один, а несколько импульсов, отраженных от самолетов, то на экране трубки эти светящиеся точки получатся на нескольких радиусах развертки, где они сольются и дадут изображение в виде небольшой светящейся дужки.



Фиг. 40. Экран электронно-лучевой трубки с радиально-круговой разверткой.

Время послесвечения экрана трубки выбирается таким, чтобы изображение целей сохранялось на трубке до тех пор, пока антенна станции не совершит полный оборот.

Таким образом, экран индикатора кругового обзора непрерывно дает полную воздушную обстановку, на нем видны отражения от всех самолетов, находящихся в данное время в радиусе действия станции, при этом на индикаторе имеется возможность определить дальность и азимут каждого самолета.



Фиг. 41. Круговая развертка со шкалой дальности.

Экран трубки индикатора кругового обзора приведен на фиг. 40, где видны масштабные кольца, азимутальная шкала и отметки целей. Зная масштаб колец, по индикатору можно определить дальность и азимут целей.

Существует большое количество различных типов инди-

каторов; все они тем или иным способом и с различной точностью дают сведения о направлении и дальности до цели. Существуют, например, индикаторы, где временна́я развертка, называемая круговой разверткой (фиг. 41), имеет форму окружности. Такой способ увеличивает точность отсчета в 3,14 раза по сравнению с отсчетом при помощи развертки, движущейся по диаметру трубки.

Индикаторы, дающие на экране трубки светлые отметки, обладают тем недостатком, что яркий дневной свет мешает наблюдению за экраном, приходится затемнять помещение или надевать на трубку специальный экран (тубус), что ограничивает наблюдение.

ИЗМЕРЕНИЕ РАССТОЯНИЙ МЕТОДОМ НЕПРЕРЫВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Описанный выше импульсный метод работы передатчика имеет недостаток — наличие «мертвой зоны» у радиолокационной станции. Дело в том, что радиоволна, имеющая огромную скорость, за время излучения импульса успеет распространиться на сравнительно большое расстояние. Так, например, в течение одной микросекунды радиоволна пройдет расстояние, равное 300 *м*, и, отразившись от препятствия, находящегося на расстоянии 150 *м*, успеет вернуться к радиолокационной станции. Но передатчик радиолокационной станции непрерывно в течение 1 *мксек* излучает мощный импульс высокочастотных колебаний, значит, в этот промежуток времени отраженный импульс не может быть принят приемником станции. Следовательно, радиолокатор не может измерять расстояние до объектов, находящихся на расстоянии (для данного примера) меньше чем 150 *м*.

Такую «мертвую зону», определяемую длительностью импульса, в пределах которой радиолокатор не может определять расстояние до находящихся в ней объектов, имеет каждая радиолокационная станция, работающая импульсным методом.

Из сказанного можно сделать важный вывод, заключающийся в том, что импульсный метод работы радиолокационной станции пригоден для измерения относительно больших расстояний — от десятков метров и больше.

Современное развитие радиолокационной техники позволяет получать очень кратковременные импульсы высокочастотной энергии, но и это не всегда может удовлетворить

требованиям измерения малых расстояний. В качестве примера можно указать на импульсные корабельные станции для обеспечения безопасного плавания корабля в тумане и ночью. Такая станция работает импульсом продолжительностью всего 0,2 *мксек*, при этом она измеряет расстояние до препятствий, находящихся от корабля не ближе чем 32 *м*.

Между тем, существует потребность точного измерения как расстояний, значительно меньших указанной величины, так и больших расстояний.

Устройство для измерения сравнительно больших расстояний с большой точностью практически осуществлено впервые в мире в Советском Союзе доктором техн. наук Е. Я. Щеголевым на основе разработанного в 1930 г. советскими академиками Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси метода использования фазовых соотношений. Это устройство дает очень большую точность. Так, перемещение корабля даже на долю метра может быть измерено на расстоянии нескольких сотен километров.

В отличие от импульсного метода работы при фазовом методе радиостанции непрерывно излучают незатухающие колебания точно известной длины волны. В настоящее время применяется несколько разновидностей систем, измеряющих расстояние при помощи фазового метода, но все они в той или иной мере используют принцип, открытый советскими учеными Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси.

В качестве примера измерения малых расстояний расскажем об одной схеме, работающей при непрерывном излучении. Такая схема применяется в самолетных радиовысотомерах малых высот. Принцип действия радиовысотомера заключается в следующем.

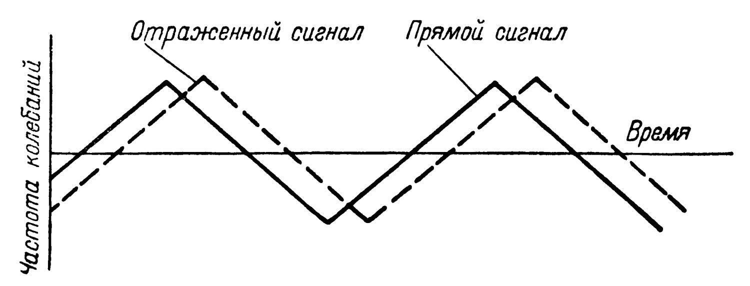
Приемо-передатчик радиовысотомера работает в диапазоне дециметровых волн. Приемная и передающая антенны, представляющие собой полуволновые вибраторы, имеют небольшие размеры и устанавливаются таким образом, чтобы металлические части самолета не экранировали излучение к земной поверхности и прием отраженной энергии, а излучаемая передатчиком энергия не попадала в приемную антенну.

Диаграммы излучения (и приема) антенн направлены к земле.

Передатчик радиовысотомера через антенну непрерывно излучает колебания, частота которых плавно меняется в не-

которых небольших пределах. Допустим, что закон изменения частоты будет линейным и графически такие колебания будут иметь форму ломаной кривой, изображенной на фиг. 42.

Энергия ультравысокой частоты, достигая земли или водной поверхности, отражается от нее и через некоторый промежуток времени t возвращается к самолету, где принимается антенной и попадает в приемник. Время t будет за-



Фиг. 42. График изменения частоты радиовысотомера.

висеть от высоты полета самолета и может быть вычислено по формуле

$$t = \frac{2H}{c},$$

где $2H$ — двойная высота полета самолета, так как энергия должна пройти путь от самолета до земли и обратно;

c — скорость распространения электромагнитной энергии.

Одновременно с отраженной энергией в приемник попадает небольшое количество энергии непосредственно от передатчика. Как бы ни был мал промежуток времени t, оба сигнала всегда имеют разную частоту колебаний, так как частота колебаний, генерируемых передатчиком, изменяется непрерывно и достаточно быстро.

Таким образом, в приемник непрерывно поступает энергия электромагнитных колебаний двух различных ультравысоких частот. Эти два ультравысокочастотных колебания в приемном устройстве высотомера накладываются одно на другое и создают биения, за счет детектирования которых появляется составляющая новой, уже звуковой частоты.

Эта часть приемника радиовысотомера работает по тому же принципу, что и схема супергетеродинного вещательного

приемника, где в результате сложения двух частот — принятого сигнала и частоты гетеродина — получается новая частота, которая называется промежуточной. Разница между этими устройствами в том, что в супергетеродине промежутонная частота сравнительно высока (для вещательных приемников она лежит в пределах 400—1 000 *кгц*), кроме того, при настройке приемника она все время остается постоянной, так как при изменении настройки соответственно изменяется частота колебаний гетеродина. В радиовысотомере дело обстоит несколько иначе — здесь ультравысокие частоты непрерывно, по определенному закону изменяются, а разность их лежит в пределах звуковых частот и зависит от времени t, т. е пропорциональна высоте полета самолета.

В последующих каскадах радиовысотомера низкая частота преобразуется в постоянный ток, величина которого пропорциональна высоте полета, и подается на миллиамперметр (индикатор), проградуированный в метрах высоты. Этот индикатор устанавливается на приборной доске летчика.

Современные радиовысотомеры малых высот показывают высоту полета от 2 до 1 500 *м* и дают точность измерений в пределах ± 2 *м*.

Из сказанного следует, что непрерывный метод излучения позволяет измерять значительно меньшие расстояния, чем импульсный метод работы, при этом точность измерения получается сравнительно высокая.

ПАРАМЕТРЫ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ

О некоторых параметрах, характеризующих работу радиолокационных станций, уже говорилось в предыдущих разделах книги.

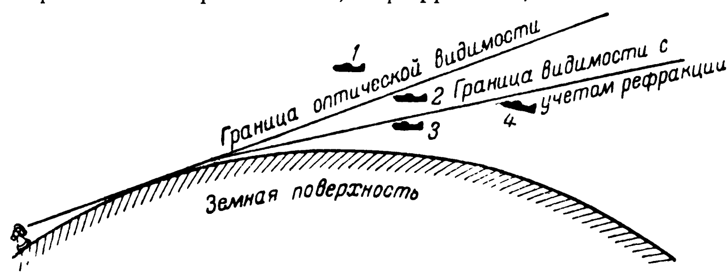
Здесь мы остановимся на дальности действия и разрешающей способности радиолокационных станций.

Дальность действия радиолокационной станции зависит от многих факторов. Исследования показали, что эта дальность в свободном пространстве пропорциональна корню четвертой степени из импульсной мощности передатчика (точнее — количества энергии в импульсе), площади отражающей поверхности цели, коэффициента направленности антенны (выигрыша антенны) и чувствительности приемника. Таковы наиболее важные факторы, влияющие на дальность действия.

Из сказанного ясно, что одно повышение мощности передатчика не дает большого увеличения дальности. Для того чтобы увеличить дальность действия радиолокационной станции вдвое, необходимо увеличить мощность передатчика в 16 раз.

Ультракороткие волны плохо огибают земную поверхность, поэтому дальность их действия ограничивается пределами прямой видимости, — увеличению дальности действия препятствует кривизна земли. Как на море мы не можем видеть корабль за горизонтом, так и радиолокационная станция не может обнаружить цели дальше прямой видимости.

Но ультракороткие волны, так же как и световые лучи, подвержены дифракции — способности незначительно огибать различные препятствия, и рефракции, т. е. способности преломляться при прохождении через слои атмосферы различной плотности. Благодаря этим явлениям дальность действия радиолокационной станции несколько увеличивается за пределы горизонта.



Фиг. 43. Границы действия радислокационной станции.

Чтобы увеличить видимый горизонт, наблюдатель поднимается на наибольшую доступную высоту. Например, на корабле наблюдательный пункт устраивают на самой высокой мачте; артиллеристы устанавливают свой наблюдательный пункт на верхушке дерева или поднимают наблюдателя на аэростате.

Очевидно, что для увеличения дальности действия радиолокационной станции ее антенна должна быть поднята по возможности выше.

Расстояние, с которого может быть обнаружен самолет, будет тем больше, чем выше летит самолет. На фиг. 43 показаны границы действия радиолокационной станции. Из

фигуры видно, что самолеты *1* и *2* могут быть обнаружены радиолокатором, а самолет *3*, хотя и находится на одинаковой дальности с самолетом *2*, не будет обнаружен, так как его высота полета меньше. Также не будет обнаружен и самолет *4*, несмотря на то, что его высота полета больше высоты полета самолета *2*.

Например, высоко летящий самолет может быть обнаружен наземной радиолокационной станцией на расстоянии 200—300 *км*, а большой корабль, хотя его отражающая поверхность значительно больше, обнаруживается корабельной радиолокационной станцией на расстоянии не более 40 — 80 *км* в зависимости от высоты подвеса антенной системы корабельной станции.

Дальность действия ультракоротковолновых радиостанций и радиолокационных станций, ограниченная условием прямой видимости, может быть подсчитана по формуле

$$Д = 3{,}57\,(\sqrt{H_1} + \sqrt{H_2}),$$

где $Д$ — дальность, *км*;

H_1 и H_2 — высоты приемной и передающей антенны или высота антенны радиолокационной станции и высота цели, *м*.

Приведенная формула показывает, что дальность действия радиолокационной станции в основном ограничивается кривизной земли, зависит от высоты антенны и высоты полета цели и не может быть увеличена только повышением мощности передатчика.

Дальность действия радиолокационной станции связана также с выбором частоты повторения импульсов. Чтобы радиолокационная станция при своем обзоре не пропустила быстро движущийся самолет, необходимо, чтобы число импульсов, излучаемых антенной за время поворота ее на небольшой угол, было, по возможности, большим. Кроме того, чем больше отраженных импульсов будет принято на станции за 1 сек., тем интенсивнее будет свечение экрана, особенно при слабых сигналах, что равносильно увеличению дальности действия радиолокационной станции. Значит, с этих точек зрения повышение частоты повторения импульсов выгодно.

Однако такое повышение частоты в то же время ограничивает дальность действия радиолокационной станции. При повышении частоты сокращается время между импульсами, т. е. пауза, в течение которой импульс должен дойти до са-

мой дальней цели и, отразившись, вернуться на станцию. Если это условие не будет выполняться, то расстояние до дальних целей не может быть определено, так как, прежде чем отраженный импульс вернется на станцию, антенна излучит уже новый импульс.

Зная скорость распространения радиоволн, нетрудно подсчитать, какая максимальная частота повторения импульсов может быть выбрана при данной максимальной дальности обнаружения.

О минимальной дальности обнаружения было сказано выше.

Длительность импульса определяет разрешающую способность данной радиолокационной станции по дальности, т. е. то наименьшее расстояние между двумя целями, при котором отраженные сигналы на электронно-лучевой трубке видны отдельно (при этом предполагается, что цели находятся на одном азимуте и угле места). Разрешающую способность по дальности можно вычислить, зная длительность импульса, по следующей формуле:

$$\Delta Д = \frac{\tau \cdot c}{2},$$

где τ — длительность импульса, *мксек*;

c — скорость электромагнитной волны (300 *м/мксек*).

Например, для импульсов длительностью 3 *мксек*

$$\Delta Д = \frac{3 \cdot 300}{2} = 450 \text{ м}.$$

Поясним сказанное. Как уже говорилось, хотя импульс электромагнитной энергии имеет очень небольшую продолжительность, исчисляемую микросекундами, но вследствие громадной скорости электромагнитной волны в пространстве он растягивается на значительное расстояние. Так, импульс длительностью 3 *мксек* в пространстве растянется на 900 *м*. Поэтому, когда передний фронт импульса электромагнитной энергии достигнет цели и отраженная энергия начнет свой путь обратно к радиолокатору, задний фронт прямого мощного импульса будет еще на расстоянии 900 *м* от цели. Так как скорости прямого и отраженного импульсов одинаковы, то некоторое время в пространстве, равном половине протяженности импульса, будут находиться одновременно оба импульса — прямой и отраженный.

То же самое будет наблюдаться на экране индикатора. Передний фронт импульса, отраженного от дальней цели,

находящейся на расстоянии (для нашего примера) меньше 450 *м* от другой ближней цели, появится на экране индикатора раньше, чем закончится изображение импульса, отраженного от ближней цели. В результате на экране станции импульсы, отраженные от двух целей, сольются и дадут несколько увеличенное изображение, полученное как бы от одного объекта. Если целей будет больше двух и все они на одном азимуте и на расстоянии, меньшем, чем 450 *м* одна от другой, то в этом случае на экране будет наблюдаться увеличенная отметка от всех целей одновременно. Увидев такую отметку на индикаторе, можно сказать, что радиолокационная станция обнаружила групповую цель, в которой количество отдельных целей может быть определено лишь приблизительно.

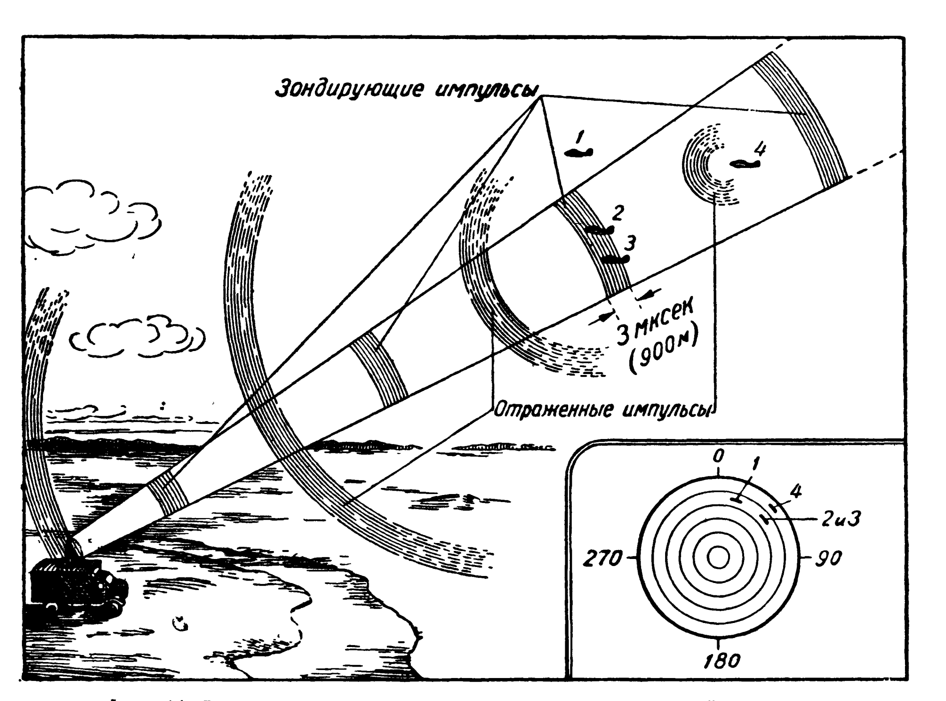
Вот почему радиолокационная станция не может различать отдельные цели, находящиеся в пространстве на расстоянии одна от другой, равном половине протяженности импульса.

Из сказанного следует, что чем короче импульс, тем лучше разрешающая способность радиолокатора по дальности. Однако значительное уменьшение длительности импульса имеет свою отрицательную сторону, — уменьшая длительность импульса, мы одновременно уменьшаем количество излучаемой энергии (при неизменной мощности в импульсе), а это в свою очередь уменьшает дальность действия радиолокационной станции.

Работа радиолокационной станции характеризуется также разрешающей способностью по азимуту, т. е. тем наименьшим углом между двумя целями, находящимися на одном расстоянии от станции, при котором на экране индикатора можно определить раздельно азимут каждой цели.

Разрешающая способность радиолокационной станции по азимуту определяется шириной луча, т. е. характеристикой направленности антенной системы. Чем уже луч, тем лучше разрешающая способность станции по азимуту.

На фиг. 44 видно, что из группы четырех летящих самолетов на экране индикатора радиолокационной станции будут видны отметки только трех целей: самолетов *1* и *4* и одновременно двух самолетов —*2* и *3*, отметка от которых будет увеличена, что говорит об обнаружении групповой цели. В данном примере по индикатору можно определить дальность и азимут только трех целей, так как самолеты *2* и *3* летят на расстояниях по дальности меньше, чем 450 *м*,



Фиг. 44. Разрешающая способность радиолокационной станции.

а самолет *4*, хотя и находится на одном азимуте с ними, но летит на расстоянии, большем, чем разрешающая способность радиолокационной станции по дальности, поэтому его отметка на индикаторе будет видна отдельно.

ПРИМЕНЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Теперь, когда читатель ознакомился с основными принципами работы радиолокационных станций и их отдельных узлов, а также с физическими явлениями, происходящими при этом, расскажем о разнообразном применении радиолокационной техники в военном деле и в различных отраслях народного хозяйства и науки.

РАДИОЛОКАЦИЯ В ВОЕННОМ ДЕЛЕ

Обнаружение и наведение самолетов

До появления радиолокационных методов для обнаружения приближающихся самолетов применялись звукоулавливатели, радиус их действия был небольшой, а с повышением скоростей самолетов они потеряли свое значение. На смену им пришли радиолокационные станции дальнего обнаружения.

Радиолокационные станции позволили обнаруживать вражеские самолеты на расстоянии 100—200 *км*, кроме того, они одновременно давали сведения о дальности, направлении и высоте полета самолетов. Полученные сведения давали возможность командованию своевременно выслать навстречу врагу истребители. Контролируя при помощи радиолокационной станции полет своих истребителей и одновременно наблюдая за полетом вражеских самолетов, офицер штаба, давая команды по радиотелефону летчикам, наводил и сближал истребители с вражескими самолетами до расстояния 1,5—2 *км*. Если наведение происходило днем, то с этого расстояния летчики могли видеть вражеские самолеты и шли в атаку на них.

Ночью сближение самолетов производилось также по указаниям наземной станции, а в районе нахождения вражеских самолетов летчик ночного истребителя включал свою самолетную радиолокационную станцию, которая обычно имеет небольшой радиус действия, и, наблюдая за экраном индикатора, сближался с противником и атаковал его.

Опознавание самолетов и кораблей

Первые радиолокационные станции обнаружения давали знать о приближении воздушных или морских целей, однако они обладали большим недостатком — по отраженным сигналам, видимым на индикаторах радиолокационных станций, нельзя было сказать, чьи это самолеты или корабли — свои или чужие.

Сначала для опознавания своих самолетов, обнаруженных радиолокационной станцией, применяли специальный условный маневр, который должен сделать самолет по запросу с земли — покачивание крыльями или полет по кругу и др. По изменению импульса, отраженного от самолета и видимого на индикаторе радиолокационной станции, можно было судить о том, летит ли это вражеский или свой самолет.

Такой способ опознавания был очень ненадежным, мешал самолету выполнять его задание и не всегда мог быть использован. Вскоре этот недостаток в опознавании был устранен.

Для опознавания самолетов и кораблей на них стали устанавливать прибор, называемый СЧ (сокращение от слов свой — чужой). Это небольшой приемо-передатчик, работающий автоматически. Когда радиолокационная станция облучает самолет или корабль, оборудованный прибором СЧ, антенна этого прибора принимает сигналы радиолокационной станции; далее они поступают в приемник СЧ и приводят в действие передатчик, который дает свои ответные импульсы на волне радиолокационной станции. Эти импульсы посылаются передатчиком СЧ в условном порядке с различными интервалами, которые можно изменять по определенному расписанию (кодировать).

На индикаторе радиолокационной станции рядом с отраженными импульсами от самолета появляются более мощные импульсы от прибора СЧ, расположенные в определенном порядке. Порядок следования опознавательных сигналов, совпадающий с заданным на данное время кодом, сигнализирует о том, что обнаруженный самолет является своим.

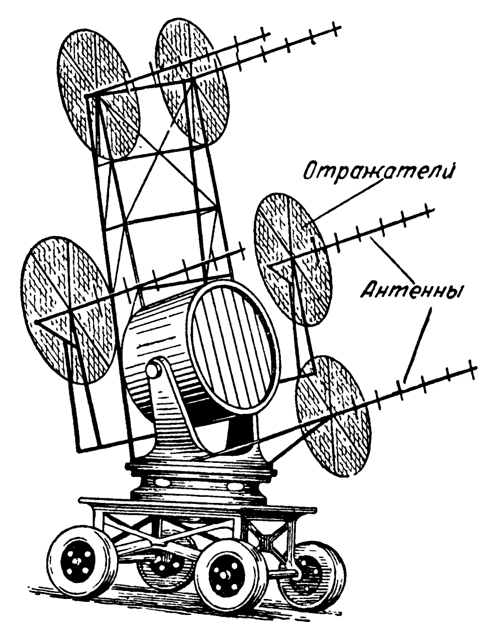
Появление опознавательных приборов значительно увеличило эффективность боевого применения радиолокации.

Радиолокационные прожекторные станции

Вероятно, многие читатели видели, как в темную ночь прожекторы ищут в воздухе самолет. Такой метод демаскирует прожектор и охраняемый им объект и не всегда дает положительные результаты.

Существуют прожекторы, на которых устанавливается радиолокационная станция.

Такая станция, как обычный радиолокатор, производит поиск самолета. Обнаружив его по своим индикаторам, команда станции все время направляет антенну радиолокатора, а вместе с ней и прожектор, точно на самолет. Когда



Фиг. 45. Прожектор с антеннами радиолокационной станции.

расстояние до самолета, определяемое радиолокатором, будет в пределах дальности действия прожектора, команда включает прожектор, и его луч неожиданно для летчика точно освещает самолет.

На фиг. 45 дан общий вид прожектора с антеннами радиолокационной станции.

Борьба с подводными лодками

Успешность борьбы с подводными лодками сильно повысилась с момента применения для этой цели специальных радиолокационных станций. Такие станции устанавливались на кораблях и самолетах. Эффективность самолетных станций значительно больше корабельных, так как станция, установленная на самолете, может одновременно «осмотреть» значительный район и обнаружить на большем расстоянии идущую под перископом подводную лодку. Самолет вызывает по радио специальные корабли-истребители, которые, прибыв в район, где обнаружена лодка, забрасывают ее глубинными бомбами.

Радиолокация в военно-морском флоте

На современном военном корабле устанавливается большое количество радиолокационных станций различного назначения. Здесь можно встретить станции дальнего обнаружения самолетов, станции наведения самолетов-истребителей, станции обнаружения надводных и подводных кораблей, станции для точного определения координат и расстояния до морских и воздушных целей, станции для наведения прожекторов, станции для наведения зенитных орудий, станции опознавания самолетов и кораблей; в штурманской рубке можно увидеть индикаторы специальных навигационных радиолокаторов дальнего и ближнего действия и другие радиолокационные приборы.

Обнаружение вражеских кораблей, их преследование и морской бой ведутся при непременном участии различных радиолокационных станций. На первом этапе ведут поиск станции дальнего обнаружения; одновременно станции опознавания определяют принадлежность кораблей, и если окажется, что обнаружен враг, корабль начинает преследовать его, при этом радиолокационная станция непрерывно определяет координаты вражеского корабля.

При сближении с врагом, на определенном расстоянии до него, вступает в действие радиолокационная станция ближнего действия, которая с большой точностью определяет координаты и расстояние до вражеского корабля. Затем, когда вражеский корабль окажется на дистанции возможного поражения, начинается обстрел врага, при этом артиллеристы пользуются для наводки орудий данными, полученными при помощи радиолокационной станции.

При корректировке артиллерийского огня радиолокационная станция дает поправки, определяя место разрыва снаряда по отраженным от столба воды импульсам, которые видны на индикаторе радиолокационной станции.

Современные радиолокационные станции позволяют вести морской бой ночью, в тумане, т. е. в условиях, при которых ранее такой бой вести было невозможно.

И действительно, во время второй мировой войны было проведено несколько таких морских сражений, окончившихся потоплением крупных немецких военных кораблей.

Таким образом, применение в военно-морском флоте радиолокации во многом изменило тактику морского боя и расширило возможность применения военных кораблей ночью и в плохую погоду.

Радиолокация в авиации

На современном тяжелом бомбардировщике дальнего действия, так же как и на морском корабле, устанавливаются радиолокационные станции различного назначения.

Обязательной принадлежностью любого военного самолета является радиолокационная станция опознавания — СЧ. При помощи такой станции может опознаваться принадлежность самолета с земли и с корабля, кроме того, экипаж самолета сам может определить принадлежность корабля или встреченного в воздухе самолета.

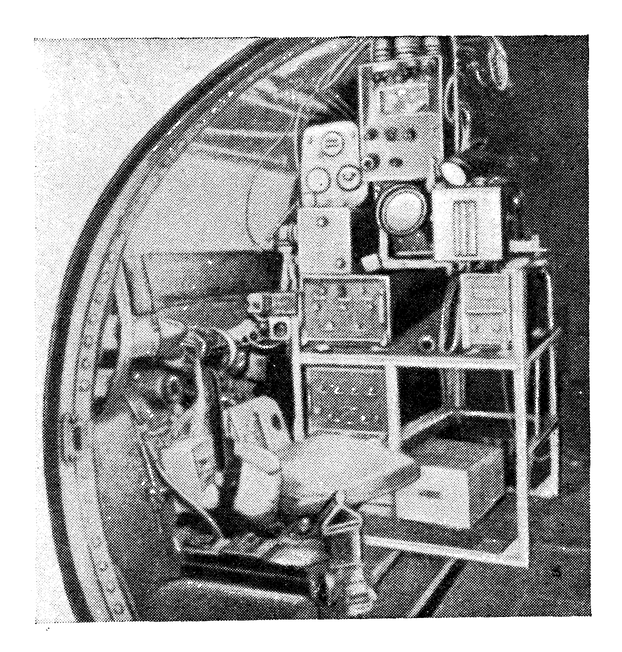
Радиолокационный высотомер больших высот с большой точностью определяет истинную высоту полета, которую нужно знать штурману для расчета при бомбометании. Как известно, барометрический высотомер дает показание высоты полета относительно уровня аэродрома вылета, и без поправки на истинное давление у земли в данном месте показания такого высотомера будут неточными.

Другой радиовысотомер дает истинное показание малых высот. Он оказывает большую помощь летчику при пробивании облачности и при посадке на аэродром в сложных метеорологических условиях (в туман, в дождь или снег).

Специальный индикатор навигационной наземной системы дальнего действия помогает штурману-навигатору определить свое действительное место и, не видя цели, с большой точностью выводить самолет в заданный район бомбометания.

Установленная на самолете специальная панорамная станция в соединении с радиолокационным бомбардировочным прицелом (фиг. 46) позволяет в радиусе 60—80 *км* наблюдать сквозь облака на экране индикатора грубую карту местности, над которой пролетает самолет.

На фиг. 47 показан снимок экрана индикатора, на котором видна радиолокационная карта, полученная при помощи самолетной панорамной станции.



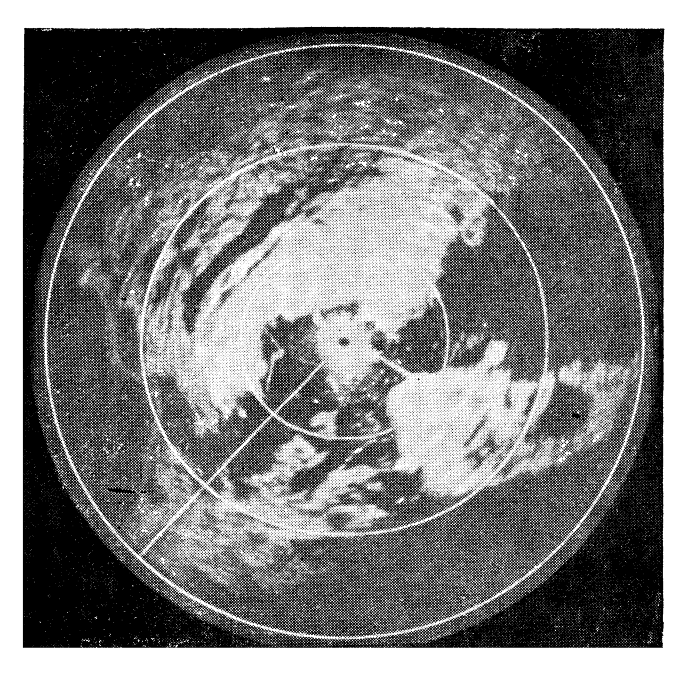
Фиг. 46. Радиолокационная станция для навигации и бомбометания, установленная на самолете.

На фотографии ясно видны водные поверхности, которые получаются на индикаторах темными, и суша, видимая на трубке как светлые пятна с различной интенсивностью свечения. На фотографии также можно легко опознать мост, видимый как яркая черта.

Радиолокационное изображение значительно отличается от карты или обычной фотографии земли с самолета, однако оно помогает штурману самолета ориентироваться за облаками или ночью, не видя земли. Штурман самолета, сличая

полученное изображение с картой местности, по характерным ориентирам определяет свое местонахождение.

Такое изображение получается на индикаторе самолетной радиолокационной станции, работающей на сантиметровых волнах, вращающаяся антенна которой излучает короткие импульсы в. ч. энергии по направлению к земле. В зависимости от свойств отражающей поверхности, от угла падения радиоволн и положения самолетной антенны часть



Фиг. 47. Изображение земной поверхности на экране панорамной самолетной радиолокационной станции.

отраженной энергии возвращается к самолету, при этом количество отраженной энергии будет различно для различных участков отражающей поверхности.

Например, гладкая водная поверхность отражает радиоволны под тем же углом, под которым они упали на нее, поэтому такие волны, отразившись от воды, не вернутся к самолету, на экране индикатора никаких отметок не получится, и он останется темным.

Необходимо сказать, что индикатор панорамной самолетной станции является индикатором с радиально-круговой разверткой, его работа описана ранее в разделе «Индикаторы радиолокационных станций».

Другие точки экрана в зависимости от силы отраженных импульсов будут светиться с различной яркостью. Например, городские постройки будут отражать сигналы сильнее, чем лес и поля, большие корпуса фабрик и заводов дадут еще более сильные отраженные сигналы. Особенно отчетливо изображаются на индикаторе корабли на море, озера, реки и мосты.

Таким образом, на экране индикатора панорамной станции получится план местности в яркостном изображении.

На станции имеется возможность выбирать масштаб и дальность обзора, при этом на индикаторе видны светящиеся концентрические окружности — это масштабные метки дальности, которые дают возможность определять дальность до видимых на индикаторе ориентиров.

При крупном масштабе, где радиус обзора большой, населенные пункты будут видны на индикаторе как яркие пятна на более темном фоне.

При приближении к цели оператор переключает масштаб на более мелкий, при этом на индикаторе можно различить очертания города, а на индикаторах радиолокационных станций с высокой разрешающей способностью можно различить кварталы города, улицы и отдельные крупные строения.

При помощи специального устройства панорамной радиолокационной станции производится автоматическое сбрасывание бомб на выбранную цель. Такое устройство позволяет производить бомбометание по невидимым целям ночью и сквозь облака, при этом точность бомбометания получается достаточно высокой.

На тяжелом бомбардировщике устанавливаются радиолокационные станции, связанные со стрелково-пушечным вооружением самолета. Эти станции при появлении в зоне их действия вражеских самолетов автоматически наводят пушки на цель, определяют дальность до нее и при приближении цели на дистанцию действительного огня автоматически открывают огонь.

Самолетная радиолокационная аппаратура по сигналам наземного импульсного маяка помогает самолету возвра-

щаться на свою базу, указывая штурману направление на аэродром и расстояние до него.

Если самолет возвратится на свой аэродром в неблагоприятную погоду, то здесь на помощь летчику приходит радиолокационная станция, которая дает точное направление на взлетно-посадочную полосу аэродрома и указывает траекторию снижения. При помощи такой станции летчик может произвести посадку самолета на аэродром почти в любую погоду.

Радиолокационная аппаратура устанавливается также на самолетах-истребителях.

На одноместном самолете, где летчик выполняет многочисленные обязанности, наиболее уязвимым местом является хвост самолета, откуда враг может неожиданно атаковать истребитель.

Радиолокация и здесь приходит на помощь летчику. На истребителях, а также и на других типах самолетов устанавливается радиолокационная станция «защиты хвоста». Такая станция при помощи световой или звуковой сигнализации заранее предупреждает экипаж самолета, и летчик, сделав соответствующий маневр, срывает замысел врага, рассчитанный на неожиданное нападение.

Радиолокация в артиллерии

Мы уже рассказывали о том, какую помощь оказывает радиолокация судовой артиллерии при обстреле морских кораблей.

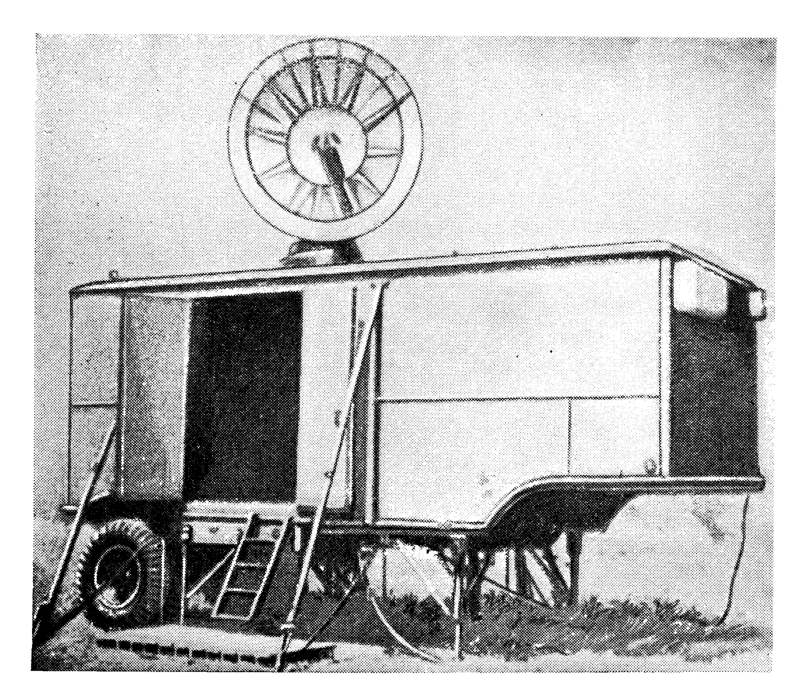
Радиолокационные станции, установленные на береговых батареях, дают возможность открыть прицельный огонь по вражеским кораблям на большой дистанции.

Применение радиолокационной техники значительно повысило эффективность огня зенитной артиллерии.

Специальная радиолокационная станция орудийной наводки зенитной артиллерии, наружный вид которой приведен на фиг. 48, работает в сантиметровом диапазоне волн. Она может работать в двух режимах — поиска и сопровождения.

В первом режиме станция работает как обычный радиолокатор кругового обзора и обнаруживает самолеты на расстоянии 50—60 *км*, на индикаторе видна общая воздушная обстановка и грубо определяется дальность до целей.

Затем, когда самолет приблизится на расстояние 20—25 *км*, станция может быть переключена во второй режим — автоматического сопровождения. В этом режиме антенна станции устанавливается в направлении на выбранную цель и автоматически поворачивается, следя за полетом цели;



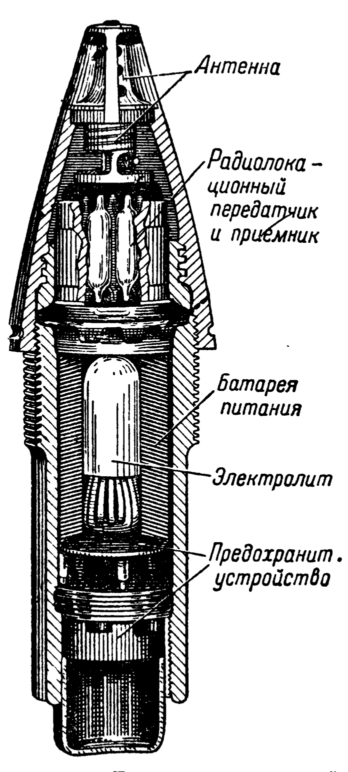
Фиг. 48. Радиолокационная станция орудийной наводки.

при этом специальное устройство станции показывает азимут, угол места и точную наклонную дальность до цели. Полученные данные непрерывно передаются в прибор управления артиллерийским зенитным огнем (ПУАЗО).

Возможная ошибка при определении координат цели очень мала — по дальности она не превышает 25—30 *м*, а по азимуту и углу места — не больше нескольких сотых градуса.

Большую роль в повышении эффективности огня зенитной артиллерии сыграли специальные радиолокационные станции, помещающиеся в головке артиллерийского снаряда (фиг 49).

В конструкцию такой станции входят антенна для передачи и приема, радиолокационный передатчик, приемник для приема отраженных от цели сигналов, специальная сухая электробатарея, ампула с электролитом для электробатареи, вспомогательный детонатор для взрыва главного заряда и специальный автоматический взрыватель, уничтожающий снаряд в случае неисправности или промаха.



Фиг. 49. Головка артиллерийского снаряда с радиолокационной станцией.

Снаряд с радиолокационным взрывателем действует следующим образом.

При хранении снарядов на складе и до момента выстрела э. д. с. батареи равна нулю. В момент выстрела разбивается ампула с электролитом и заливается батарея, которая сразу же начинает давать ток для питания приемо-передатчика радиолокационной станции. Передатчик через антенну станции излучает вокруг снаряда электромагнитные волны с диаграммой направленности особой формы. При приближении снаряда к самолету или при пролете около него на заданном расстоянии действительного поражения отраженные от самолета сигналы, принятые на антенну снарядной станции и усиленные ее приемником, приводят в действие вспомогательный детонатор и снаряд взрывается, поражая своими осколками самолет.

Создание такой радиолокационной станции потребовало разработки новых миниатюрных деталей, радиоламп и источников питания, к которым предъявляются очень большие требования в отношении прочности. Во время выстрела все детали в головке снаряда испытывают громадные перегруз-

ки при ускорении в 20 000 раз больше земного ускорения. Так, например, на деталь весом в 5 *г* во время выстрела действует сила, равная 100 *кг*.

НЕКОТОРЫЕ ВОЕННЫЕ ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ РАДИОЛОКАЦИЕЙ

При помощи радиолокационной станции можно определить позиции минометной батареи, наблюдая за полетом мин.

Обычно все передвижения войск во фронтовой полосе делаются тайно, под покровом ночи или тумана. Однако такая маскировка недействительна для радиолокатора; он может обнаружить передвижение танков, автомобилей и артиллерии в любую погоду, кроме того, станция дает данные об азимуте и дальности движущихся целей.

При маневренной войне, когда линия фронта непрерывно меняется, летчику с самолета очень трудно определить, где находятся свои войска и где начинаются окопы врага, на которые надо сбрасывать бомбы. На помощь летчику приходит маленькая окопная радиолокационная станция, которая на запрос летчика дает ответный сигнал, видимый на экране индикатора самолетной станции. По этим сигналам летчик может определить направление на наземную станцию и расстояние до нее.

Такие же радиолокационные станции-маяки, установленные в определенном месте на земле или в море, помогают летчику вывести самолет в заданное место.

Противодействие радиолокации

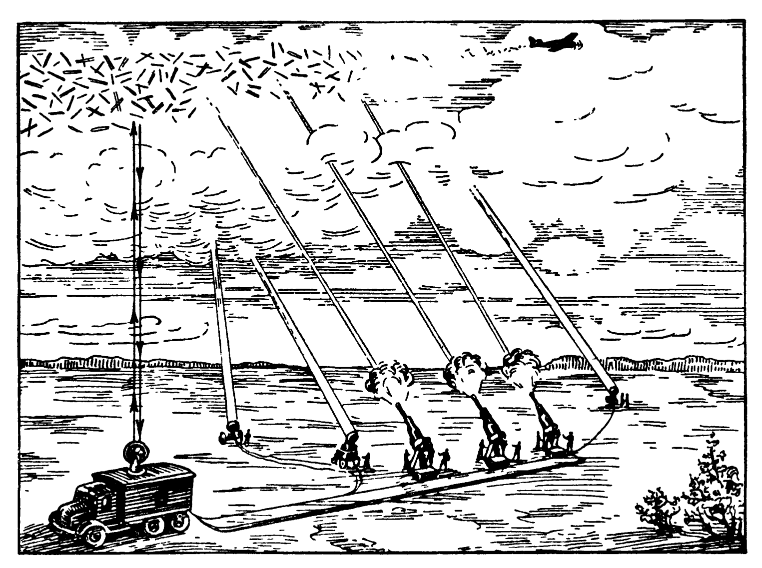
Появление всякого нового средства ведения войны сопровождается усиленной разработкой способов борьбы с этим средством. Каждый новый вид оружия обладает слабыми сторонами. Слабые стороны нашлись и у радиолокационной техники.

Оказалось, например, что радиолокатор можно «обмануть», создав искусственные отражающие поверхности.

Во время войны немецкие подводные лодки разбрасывали плавающие буйки, которые давали на индикаторе самолетного радиолокатора сигналы, сходные с сигналами, отраженными от подводной лодки. Такие буйки вводили в за-

блуждение летчиков и помогали скрываться подводной лодке.

Для борьбы с самолетным панорамным радиолокатором также создавались искусственные отражатели, устанавливаемые на поверхности водоемов, служащих хорошим ориентиром для панорамных радиолокационных станций.



Фиг. 50. Сбрасывание металлизированных полосок с самолета для помех радиолокатору орудийной наводки.

Против радиолокационных станций орудийной наводки зенитной артиллерии самолеты вели борьбу, сбрасывая большое количество металлизированных полосок или лент из фольги (фиг. 50), длиной в полволны.

Беспорядочно кружась в воздухе и медленно опускаясь на землю, полоски отражали электромагнитную энергию и создавали на экране индикатора наземной станции очень большое количество неустойчивых сигналов, на фоне которых нельзя было отличить сигналы, отраженные от самолетов.

Такой метод защиты самолетов давал хорошие результаты, но требовал дополнительной нагрузки самолетов лентой. Часто для этой цели применялся специальный самолет,

который вместо бомбовой нагрузки загружался большим количеством металлизированных полосок.

Помехи радиолокационным станциям могут быть созданы специальным передатчиком помех, устанавливаемом на самолете, но борьба со станциями, работающими в диапазоне сантиметровых волн, представляет большие трудности и требует сложных устройств. Чтобы сигнал помехи был эффективным, недостаточно только работать точно на волне радиолокационной станции противника, необходимо еще антенну передатчика помех точно направить на эту станцию противника.

Таким образом, чем короче волны радиолокационных станций, тем сложнее борьба с ними.

РАДИОЛОКАЦИЯ НА СЛУЖБЕ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА И НАУКИ

Воздушная и морская навигация

Идея применения радиоволн для определения расстояния появилась вскоре после открытия радио А. С. Поповым.

Русский моряк А. Щенснович в 1914 г. получил привелегию на «Способ определения расстояний и местонахождения корабля».

А. Щенснович предложил давать с корабля радиосигнал, который принимался на маяке и приводил в действие звуковой подводный передатчик. Расстояние до маяка определялось по интервалу времени между подачей радиосигнала с корабля и приемом пришедшего на корабль звукового сигнала с маяка.

Новейшие методы радионавигации, определение местоположения корабля на море или самолета в воздухе и измерение расстояний, основанные на принципе использования фазовых соотношений радиоволн, впервые были предложены в 1930 г. советскими учеными, академиками Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси.

На основе этого метода еще в 1937 г. Гидрографическим Управлением Главсевморпути были построены радиодальномеры, при помощи которых измерялось расстояние при гидрографических промерах.

Как известно, гидрографические промеры состоят из измерения глубины моря в данной точке при одновременном

определении координат этой точки. До появления эхолота главная трудность таких промеров заключалась в возможности быстро и точно производить замер больших глубин. Эта задача значительно облегчилась с появлением эхолотов, дающих непрерывные показания глубины моря во время хода корабля.

Появление радиодальномера, разработанного в Советском Союзе доктором техн. наук Е. Я. Щеголевым, помогло успешно решить задачу точного и быстрого определения положения корабля по измерению расстояния от опорных точек на берегу. Эти измерения можно производить в любую погоду и на расстоянии, значительно превышающем прямую видимость, при этом точность измерений получается очень высокой и, кроме того, все записи сигналов ведутся на ленту во время хода корабля. Такая лента представляет собой документ, которым пользуются при дальнейшей обработке материалов.

Этот же метод может быть также использован для определения координат самолета при аэрофотосъемке и для других геодезических работ, где требуется точное определение значительных расстояний.

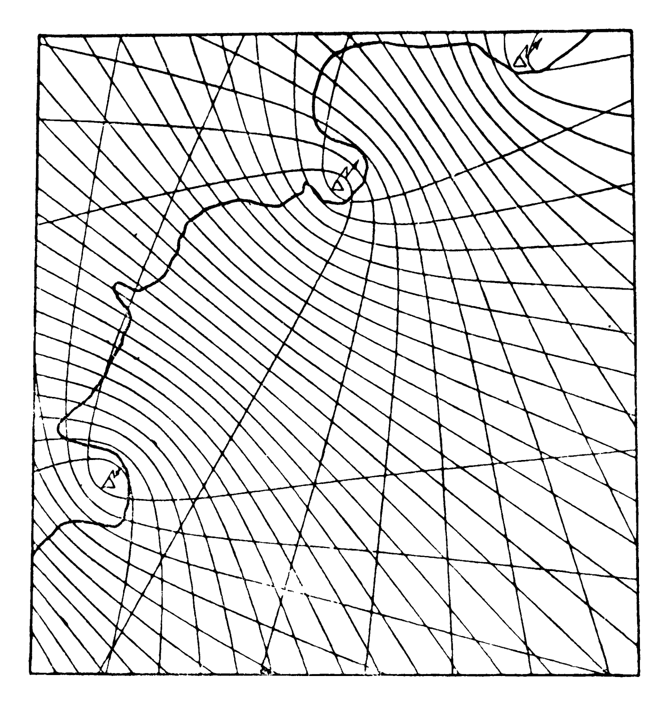
В 1938 г. советский инженер Э. М. Рубчинский предложил импульсную гиперболическую радионавигационную систему, на 5 лет опередив инженеров Англии и США.

При помощи этой системы, состоящей из трех наземных станций и работающих строго согласованно между собой, можно определить местоположение самолетов в воздухе и кораблей на море. Определение места корабля или самолета производит штурман, измеряя разность прихода импульсов радиоволн сначала от одной пары станций, затем от второй, при этом центральная ведущая станция работает поочередно с двумя ведомыми станциями.

Известно, что геометрическое место точек, имеющих постоянную разность расстояний от двух пунктов, есть гипербола. Таким образом, измерив разность времени прихода импульсов, излученных одновременно двумя наземными станциями, штурман определяет гиперболу, соответствующую этой разнице времени, а значит и разности расстояний от двух станций.

Положение корабля (или самолета) во время измерений соответствует одной из точек, находящихся на данной гиперболе. Однако одна гипербола еще не дает возможности опре-

делить месторасположение корабля. Для того чтобы определить свое место, штурман измеряет разность прихода импульсов от второй пары станций и находит вторую гиперболу. В точке, соответствующей пересечению двух гипербол, и находится корабль в момент измерений. Действительное месторасположение корабля штурман находит на карте, на которой нанесены гиперболические линии, соответствующие



Фиг. 51. Гиперболическая сетка навигационной системы.

определенной разнице времени прихода радиоволн от двух пар станций.

На фиг. 51 изображена карта местности с нанесенной на ней гиперболической сеткой, получаемой при работе двух пар станций.

Гиперболические системы навигации работают на ультракоротких, коротких и длинных волнах.

Максимальная дальность действия их равна 500 *км* для ультракоротковолновых станций и до 2 000—3 000 *км* — для станций, работающих на коротких и длинных волнах.

Точность определения месторасположения корабля или самолета, получаемая при помощи этих систем, высока и обеспечивает практические требования морской и воздушной навигации независимо от погоды.

Радиолокационные импульсные маяки, установленные на аэродромах и на трассах полетов самолетов гражданского воздушного флота, указывают летчикам правильное направление полета, и, кроме того, самолетный индикатор непрерывно показывает, какое расстояние осталось пролететь до данного маяка.

Радиолокационные маяки повышают безопасность полетов и облегчают летчику пилотирование самолета при полете по трассе в плохую погоду.

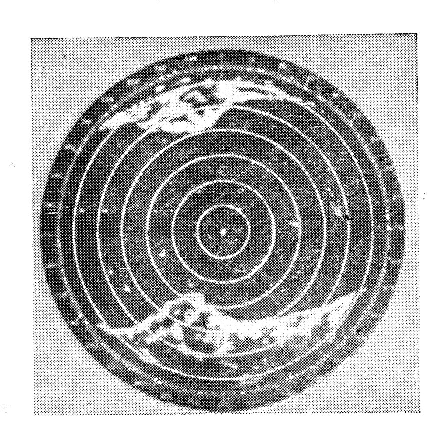
Радиолокационный высотомер малых высот, радиолокационная аппаратура, обеспечивающая посадку самолетов на аэродроме при неблагоприятной метеорологической обстановке, аэродромные радиолокационные станции, обеспечивающие наблюдение за самолетами, прибывающими в район аэродрома и рулящими на аэродроме, предназначаются для повышения безопасности полетов в гражданском воздушном флоте.

Специальная радиолокационная станция, установленная на борту самолета, позволяет обнаруживать лежащие на пути самолета грозовые тучи. Как известно, район грозы представляет известную опасность для самолета, и летчики всегда стараются обойти такой район стороной или на высоте, превышающей грозовую облачность. Для того чтобы это сделать, надо заранее знать, как далеко и в каком направлении находится грозовой фронт. Такие данные летчик может получить при помощи радиолокационной станции, работающей на волнах сантиметрового диапазона. Радиоволны определенной длины, лежащие в сантиметровом диапазоне, не проникают сквозь облака, а отражаются от них. Это явление и дает возможность определить направление и дальность до грозового фронта.

На кораблях торгового морского флота устанавливаются радиолокационные станции кругового обзора с небольшим радиусом действия до 30—40 *км*, они воспроизводят на экране индикатора морскую обстановку вокруг корабля. Такая

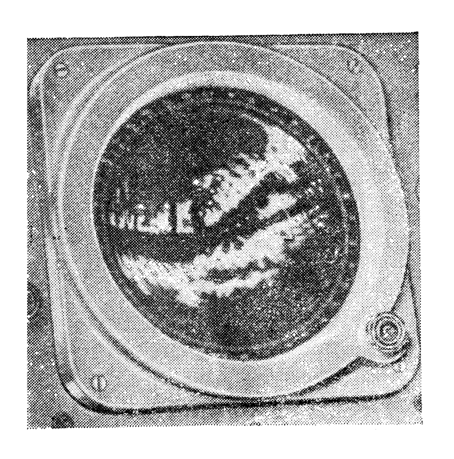
станция дает возможность штурману уверенно вести корабль ночью, в туман и проходить в порт по узкому фарватеру.

На фиг. 52 воспроизведена фотография экрана индикатора при наблюдении на максимальной дальности действия станции. На экране видны светящиеся концентрические окружности — масштабные метки, по которым определяется расстояние до кораблей (на экране они видны как маленькие светлые пятна) и до береговой черты, ясно видимой на фотографии. Азимутальная шкала с делениями дает возможность определить направление видимых на экране препятствий.



Фиг. 52. Экран индикатора морской навигационной станции при обзоре на максимальном радиусе действия.

На фиг. 53 представлена фотография того же экрана в мелком масштабе, когда весь радиус экрана соответствует обзору в 2—3 *км*. Такой масштаб включается, когда корабль входит в порт, чтобы определить безопасный проход по узкому форватеру в любую погоду.



Фиг. 53. Экран индикатора морской навигационной станции при обзоре в радиусе 2 *км*.

Очень большую помощь команде корабля оказывает радиолокационная станция, установленная на судах, плавающих в Арктике. Она своевременно ночью и в туман предупреждает экипаж о появлении на пути корабля плавающих ледяных гор — айсбергов.

Этим кратким перечислением областей применения радиолокационной техники в народном хозяйстве нашей страны не исчерпываются богатые возможности, которые таит в себе новая отрасль радиотехники.

Радиолокация на службе науки

Радиолокация широко применяется в метеорологии для предсказания погоды, получения сведений, необходимых летчикам при совершении полетов, и других целей.

Для определения скорости и направления ветра в различных слоях атмосферы метеорологи выпускают в полет шары-зонды, за которыми непрерывно ведется оптическое наблюдение, пока шар не скроется из виду. Такое наблюдение возможно днем в хорошую безоблачную погоду и то на сравнительно небольшом расстоянии от места выпуска шара-зонда.

Наблюдение за полетом шара-зонда при помощи радиолокационной станции свободно от недостатков, указанных выше, и увеличивает радиус и высоту наблюдения. Ценность таких наблюдений значительно повысилась благодаря возможности получать необходимые сведения регулярно и независимо от погоды.

Наблюдение за шаром-зондом на индикаторе радиолокационной станции ведется по отраженным импульсам, получаемым от специального отражателя, подвешиваемого к шару-зонду, что позволяет определять азимут и угол места шара-зонда на значительном удалении и на большой высоте.

При помощи наземных радиолокационных станций ведутся наблюдения за передвижением дождевых облаков и грозовых фронтов на расстоянии нескольких сотен километров. Эти наблюдения дают возможность более точно предсказывать погоду в ближайших районах.

В 1946 г. советский инженер П. О. Чечик впервые в мире использовал радиолокационные станции для наблюдений за падающими метеорами. Применение радиолокационного метода дает большие преимущества перед оптическими, так как позволяет вести наблюдения в любую погоду и днем, тогда как при помощи оптических приборов такие наблюдения возможно вести только в ясную ночь.

Радиолокационный метод наблюдения за падающими метеорами позволяет астрономам легко и просто отмечать появление метеоров и определять высоту, на которой они про-

изводят заметные ионизационные эффекты, позволяют обнаруживать скопление космической пыли в пространстве и т. д. Эти наблюдения обогащают не только астрономию, они помогают изучать строение верхних слоев атмосферы, что очень важно для многих отраслей науки.

Развитие радиолокационной техники и большие достижения в области приемной техники позволили строить чувствительные приемники с большим усилением для приема ультракоротких волн. Такие приемники по чувствительности и усилению мало отличаются от приемников на волнах давно освоенных диапазонов и даже превосходят их.

При помощи радиолокационных приемников на различных волнах от 1 *см* до 6 *м* советскими учеными были обнаружены радиоизлучения Солнца и звезд. Такие наблюдения представляют большой интерес для астрофизиков и имеют огромное значение для изучения процессов, происходящих в мировом пространстве и на Солнце.

В 1943 г. советские академики Л. И. Мандельштам и Н. Д. Папалекси доказали, что при помощи современных радиолокационных станций (с соответствующей переделкой) можно послать радиоимпульсы на Луну и получить обратно их отражения. Таким образом, по времени прохождения импульсов можно точно определить расстояние до Луны.

Такой опыт был проделан в январе 1946 г. На Луну были посланы импульсы на волне около 2,7 *м*, которые возвращались почти через 2,5 сек. Таким образом, радиолокационным методом было измерено расстояние до Луны, оказавшееся равным 768 642 *км*, что близко согласуется с данными, полученными астрономией.

Этими опытами была доказана возможность передачи радиоволн на огромное расстояние за пределы Земли. Помимо чисто технического интереса этого опыта, показывающего большие достижения радиолокационной техники, велико и его научное значение.

Применение методов радиолокации позволяет производить измерение расстояния до Луны (а в дальнейшем, вероятно, и до других планет) с большой точностью, превышающей среднюю астрономическую точность, и принципиально позволяет получать эти данные непрерывно из одного места.

Дело в том, что измерение расстояния до Луны получается в результате многочисленных наблюдений, требующих благоприятных атмосферных условий и связанных

с астрономическими наблюдениями из двух пунктов, расположенных на одном меридиане на огромном расстоянии один от другого, после чего требуется провести сложные вычисления с многочисленными поправками.

Радиолокационный метод позволяет непрерывно следить за изменением расстояния до Луны, кроме того, по интенсивности и форме отраженного импульса можно судить о структуре поверхности и составить подробную топографическую карту Луны, а в дальнейшем, вероятно, и других более удаленных планет.

В медицине радиолокационная техника применяется для изучения нервной системы человека, при ее помощи можно определить время пробега отдельных импульсов по нервной системе.

Мы уже говорили о тех промежутках времени, которые измеряются в радиолокационной технике для целей радиолокации. Используя эту технику и применяя метод, разработанный советскими академиками Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси, основанный на интерференции радиоволн, можно измерить время любых кратковременных процессов с точностью до миллиардных долей секунды.

Радиолокационная техника открывает новые богатые возможности в создании электронных счетных машин, решающих в очень короткое время самые сложные уравнения.

Великие Сталинские стройки коммунизма, для строительства которых применяется новейшая и самая совершенная техника, невиданная нигде в мире, после ввода их в эксплоатацию наряду с другим новым и совершенным оборудованием будут использовать и радиолокационную технику. Для обеспечения безопасного плавания намечается применение радионавигационной и радиолокационной аппаратуры.

На Цимлянском водохранилище, длина которого будет составлять 180 *км*, а ширина до 30 *км*, высота волны в его нижней части может достигать 3 *м*. Такое водохранилище по праву может называться «Донским морем» и, как на всяком море, судоходство на нем должно быть безопасным в любую погоду.

Как известно, в сильный туман единственными надежными средствами навигации являются радиотехнические средства и новейшая радиолокационная техника, которая в руках советских людей будет служить на пользу всему народному хозяйству нашей Родины.

Трудно перечислить все возможные отрасли науки и народного хозяйства, где может быть применена радиолокационная техника. Не подлежит сомнению, что при дальнейшем развитии радиолокации откроются еще новые и значительно более широкие возможности ее применения в науке и народном хозяйстве нашей великой Родины, победоносно строящей коммунистическое общество.

ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Радиолокация — это техника будущего. За годы мирного строительства после войны наши ученые, инженеры и конструкторы подняли технику радиолокации на высшую ступень. Советские ученые с честью выполняют указание товарища Сталина, данное им в исторической речи 9 февраля 1946 г. на собрании избирателей Сталинского избирательного округа: «превзойти в ближайшее время достижения науки за пределами нашей страны».

В руках советских людей, руководимых великим Сталиным, открытия науки, в том числе атомная энергия и радиолокационная техника, служат мирным целям.

Широкое внедрение достижений науки и техники в народное хозяйство облегчает труд советских людей, обеспечивает неуклонный технико-экономический прогресс, дает возможность успешно разрешать крупнейшие народнохозяйственные проблемы, ускорять движение вперед по пути к коммунизму.

Чего же можно ожидать от радиолокации в дальнейшем?

Радиолокационные станции, установленные на самолете, а также в различных местах земного шара, дадут возможность автоматически и совершенно безопасно вести самолет в любом направлении. Пассажирам самолета представится возможность через специальные радиолокационные устройства наблюдать на экране «радиовизора» панораму пролетаемой местности, несмотря на то, что самолет летит на громадной высоте и под ним может быть слой облаков.

При желании пассажиры самолета смогут поговорить по радиотелефону со своими родными и знакомыми, находящимися в любом пункте, при этом разговаривающие будут видеть друг друга на экране «радиовизора».

...Вот самолет приближается к пункту назначения. На световом экране пульта управления появляются сигналы, дающие все сведения, необходимые летчику для совершения посадки. Над городом стоит густой туман, однако это не

беспокоит летчика: аэродром и самолет оборудованы совершенной автоматической радиолокационной системой слепой посадки. Летчик включает автомат и на экране «радиовизора» спокойно наблюдает за посадкой самолета.

Большую роль приобретает радиолокационная техника в астрономии. Она позволит, например, посылать для исследования планет ракету без людей. В ракете будет установлено большое количество всевозможных приборов, дающих сведения о температуре, влажности, освещенности, космических лучах и т. д. В носу ракеты будет находиться антенна «радиовизора».

...Вот на «ракетной станции» около приборов управления собрались инженеры и ученые. Наступает момент отправки ракеты, подается команда, и инженер включает рубильник. Оторвавшись от земли, ракета стремительно набирает скорость. Мощная наземная радиолокационная станция контролирует полет ракеты и управляет работой двигателя рулями и другими приборами ракеты. В свою очередь телевизионная станция, установленная в ракете, непрерывно передает на землю показания всех приборов. Эти показания для дальнейшей обработки фиксируются киносъемочной камерой.

С момента взлета «радиовизор» ракеты излучает мощные радиоимпульсы, направленные на Марс. По отраженным от Марса сигналам, видимым на экране «радиовизора», ученые могут судить о расстоянии, оставшемся до Марса, и о скорости полета ракеты.

Когда скорость ракеты стала максимальной, дается команда о выключении движителя, после чего ракета продолжает полет по инерции.

Наконец, ракета приближается к Марсу. Дается новая команда о включении движителя, который теперь работает в качестве тормоза, уменьшающего скорость полета ракеты. На экране «радиовизора» уже ясно видна поверхность Марса. Когда до нее осталось 5—6 *км*, станция управления переводит ракету в горизонтальный полет, одновременно включается киносъемочный аппарат ракеты. Заснятая им пленка будет проявлена после возвращения ракеты на Землю. «Радиовизор» ракеты во время полета непрерывно передает на Землю картину поверхности Марса.

Здесь мы рассказали о возможном применении радиолокационной техники в авиации и для научных целей.

Работы, выполняемые нашими учеными и инженерами в различных научно-исследовательских учреждениях, посвя-

щены применению величайших достижений науки и техники для мирных созидательных целей.

Совсем другая картина в капиталистических странах. Современные претенденты на мировое господство — американские империалисты — заставляют служить своим человеконенавистническим целям достижения науки и техники. В то время, когда они дают срочные заказы своим «ученым» на изобретения новых средств истребления людей и разрушения мирных городов, советская наука успешно решает различные проблемы мирной жизни, служащие в интересах строительства коммунизма, для счастья советского народа и всего человечества.

Простые и великие слова любимого вождя народов, мудрого товарища Сталина: «Мы стоим за мир и отстаиваем дело мира» повторяются сейчас на всех языках народов Советского Союза.

Советский народ, вдохновляемый партией Ленина — Сталина, занят мирным созидательным трудом. С мыслью о жизни, а не о смерти, с мыслью о мире, а не о войне ведет советский народ свои великие стройки коммунизма. В этом грандиозном строительстве применяются и будут применяться все передовые и новейшие достижения науки и техники, к их числу принадлежит и радиолокационная техника, о которой мы кратко рассказали в нашей брошюре.

ЛИТЕРАТУРА

Бажанов С. А., Что такое радиолокация, Воениздат, 1949.

Шамшур В. И., Радиолокация, Госэнергоиздат, 1949.

Джигит И. С., проф., Радиолокация, Стенограмма публичной лекции Весоюзного о-ва по распространению политических и научных знаний, издательство „Правда“, 1948.

Щеголев Е. Я., доктор техн. наук, Радиотехника на службе дальней навигации, „Наука и жизнь“, 1947, № 2.

Пересыпкин И. Т., маршал войск связи, Радио—могучее средство обороны страны, Воениздат, 1948.

Спижевский И., Радиолокация в народном хозяйстве, „За оборону“, 1947, № 11.

Труды конференции по воздушной радионавигации, под редакцией акад. А. И. Берга, „Советское радио“, 1948.

Болховитинов В., Локация Луны, „Техника молодежи“, 1946, № 5—6.

Покрышкин А. И., трижды Герой Советского Союза, Крылья истребителя, Воениздат, 1948.

Честнов Ф. И., Радио сегодня, Воениздат, 1950.

Элементарный курс радиотехники ультравысоких частот, Воениздат, 1949.

НОМЕНКЛАТУРА ЧАСТОТ, ПРИНЯТАЯ НА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО ВОПРОСАМ РАДИОСВЯЗИ В 1947 г.

Название частот	Диапазон частот	Диапазон волн	Название волн
ОНЧ — очень низкие	ниже 30 *кгц*	Больше 10 000 *м*	Мириаметровые
НЧ — низкие	30—300 *кгц*	10 000—1 000 *м*	Километровые
СЧ — средние	300—3 000 *кгц*	1 000—100 *м*	Гектометровые
ВЧ — высокие	3 000—30 000 *кгц*	100—10 *м*	Декаметровые
ОВЧ — очень высокие	300 000 *кгц*—300 *мггц*	10—1 *м*	Метровые
УВЧ — ультравысокие	300—3 000 *мггц*	1—0,1 *м*	Дециметровые
СВЧ — сверхвысокие	3 000—30 000 *мггц*	10—1 *см*	Сантиметровые
КВЧ — крайне высокие	30 000—300 000 *мггц*	10—1 *мм*	Миллиметровые

В ультравысокочастотной технике применяются наименование гигагерц (сокращенно *ггц*), соответствующее 1 000 *мггц*.

Цена 2 руб. 85 коп.